This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

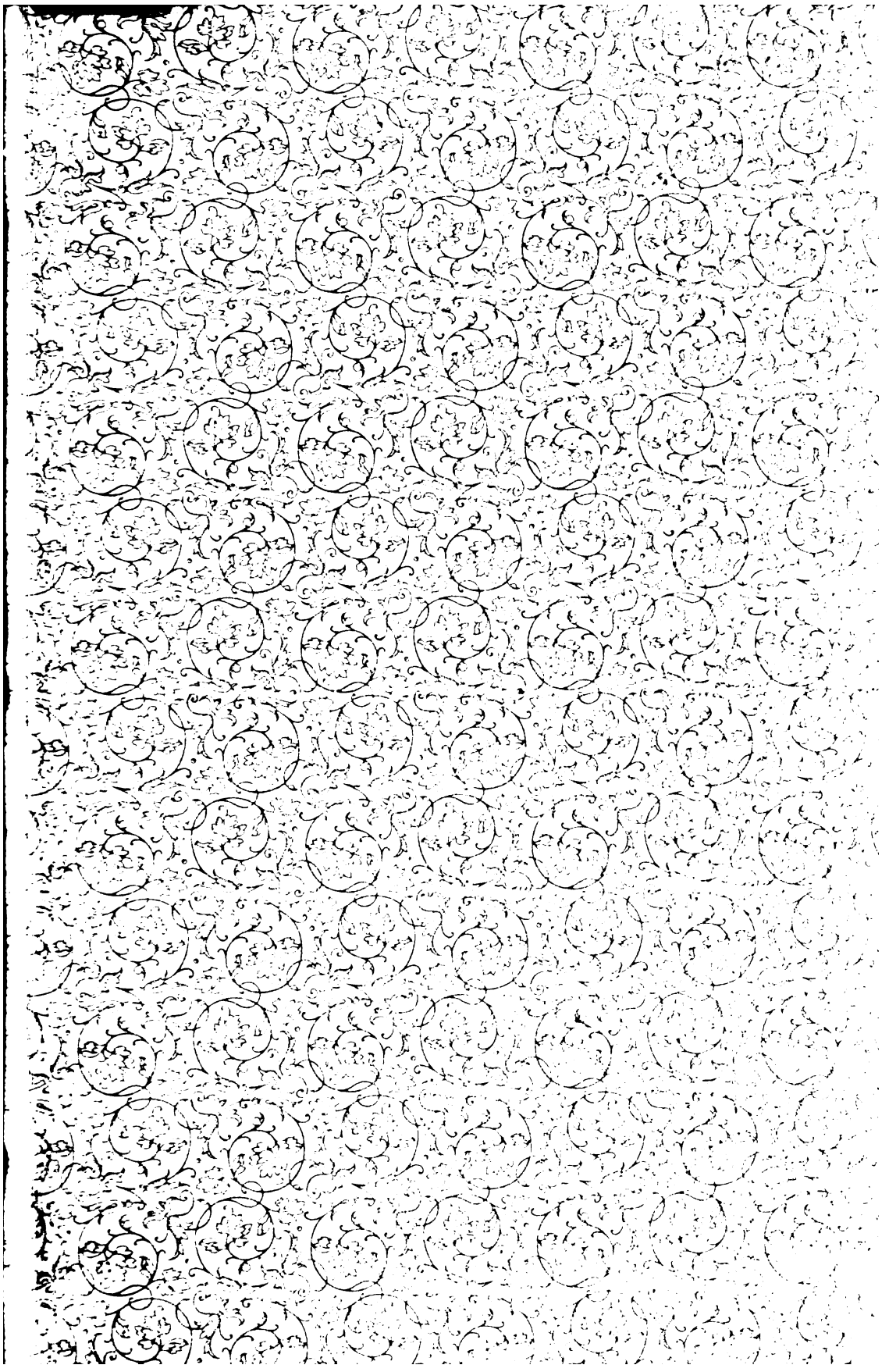
+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

University of Wisconsin
LIBRARY
Class SXP
Book .P33
1



TRAITÉ

DE

LA CHALEUR

I

1716-75 — CORBEIL. TYP. ET STÉR. DE CRETE.

TRAITÉ

DE

LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE

DANS SES APPLICATIONS

PAR

E. PÉCLET

ANCIEN INSPECTEUR GÉNÉRAL DE L'UNIVERSITÉ
PROFESSEUR DE PHYSIQUE APPLIQUÉE AUX ARTS A L'ÉCOLE CENTRALE
MEMBRE DU CONSEIL DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT

Quatrième édition

PUBLIÉE

PAR A. HUDELO

Répétiteur à l'École centrale,
Secrétaire de la Commission des logements insalubres.

TOME PREMIER

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

Boulevard Saint-Germain, en face de l'École de Médecine

M DCCC LXXVIII

55217
OCT 9 1900
SXP
P33
1
6712507

PRÉFACE

DE LA QUATRIÈME ÉDITION.

Le TRAITÉ DE LA CHALEUR de feu E. Péclet, professeur-fondateur à l'École Centrale des Arts et Manufactures, a depuis longtemps établi les principes d'une des branches les plus importantes de la science industrielle; la troisième édition de ce livre parut en 1860; depuis cette époque, de nombreux perfectionnements se sont introduits dans les procédés de l'industrie, la pratique a consacré un certain nombre d'inventions, des faits scientifiques nouveaux se sont produits : une quatrième édition de ce traité classique était devenue nécessaire pour le mettre au courant de l'état actuel des choses.

Nous avons conservé respectueusement le texte primitif et les idées émises par Péclet pour tout ce que n'a pas modifié la marche de la science et de l'industrie; mais nous nous sommes efforcé, au moyen de quelques changements et de nombreuses additions, de mettre ce livre au niveau des connaissances actuelles.

La division de l'ouvrage en trois volumes a été conservée ainsi que la division en livres et en chapitres. Le grand nombre d'additions que nous avons dû faire nous a mené à supprimer à la fin du troisième volume la relation détaillée des expériences de Péclet sur l'écoulement des gaz, sur l'émission et la transmission de la chaleur. Les lecteurs désireux de connaître

tous les éléments de ces expériences les retrouveront dans la troisième édition ; quant aux résultats, ils sont demeurés consignés avec de grands développements à la place qui leur appartient dans le corps de l'ouvrage.

Deux grands faits ont pris une place définitive dans la science depuis la publication de la dernière édition ; ce sont la théorie mécanique de la chaleur et la dissociation des corps composés sous l'influence des températures élevées ; nous avons dû en tenir compte, et il en est résulté des modifications importantes pour un certain nombre des points que nous avions à traiter.

Les phénomènes connus sur la dissociation de l'eau et de l'acide carbonique ont modifié les idées que l'on avait antérieurement sur la production des hautes températures, et nous avons dû, en conséquence, apporter de nombreux changements à ce qui concerne la combustion et la théorie des foyers.

Quant à la théorie mécanique de la chaleur, nous avons discuté les résultats qu'elle fournit pour l'écoulement des gaz et de la vapeur, en nous appuyant sur les expériences les plus probantes, et nous avons montré que de nouvelles recherches seraient à faire pour compléter cette théorie qui ne nous semble pas suffisamment répondre, dans ce cas, aux besoins de la pratique.

La question des cheminées a été aussi revue et modifiée ; nous appuyant sur les données fournies par la théorie mécanique de la chaleur, nous avons repris pour la détermination du tirage la formule que Péclet donnait dans sa seconde édition, et nous avons fourni les coefficients pratiques qui en permettent l'emploi dans les différentes circonstances.

Les divers chapitres de l'ouvrage ont été revus et complétés avec le plus grand soin ; nous citerons spécialement ce qui concerne les chaudières à vapeur, les gazogènes, la distillation, l'évaporation, les chauffages et la production artificielle du froid.

Quant au chauffage et à la ventilation des lieux habités, et

spécialement des hôpitaux, des théâtres et autres salles de réunion, nous avons cherché à donner à cette question les développements que l'intérêt d'un pareil sujet comporte ; nous avons fait voir les avantages et les inconvénients inhérents aux différents modes de chauffage ; nous avons étudié et discuté les différents systèmes de ventilation ; on trouvera à la fin du troisième volume un chapitre spécial dans lequel nous résumons tout ce qui est relatif à cette question complexe.

Nous nous sentions encouragé, dans ce laborieux travail, par le souvenir du professeur éminent dont nous avions suivi les leçons à l'École Centrale, et l'accomplissement de notre tâche nous semblait un juste tribut de respect et de reconnaissance envers sa mémoire.

A. HUDELO.

TRAITÉ

DE LA CHALEUR

LIVRE PREMIER

DE LA COMBUSTION ET DES COMBUSTIBLES.

Les sources de chaleur sont nombreuses, et cependant celles qui sont directement applicables aux besoins de l'industrie ou de l'économie domestique sont en nombre très-limité.

Il y a deux sources permanentes de chaleur à la surface de la terre : la chaleur centrale ou chaleur propre du globe et la radiation solaire ; si la première source existait seule, le rayonnement se faisant constamment vers les espaces stellaires, la température décroîtrait rapidement à la surface de la terre et, avec la chaleur, on verrait bientôt disparaître toute vie et tout mouvement. La radiation solaire non-seulement répare les pertes dues au rayonnement nocturne et maintient constante, ou à très-peu près, la température de la terre ; mais encore elle se transforme par suite du développement végétal en chaleur disponible sous la forme de combustibles.

La chaleur solaire a pu et peut encore être employée directement à produire certains résultats industriels : comme l'évaporation dans les marais salants, les bâtiments de graduation, les séchoirs à air libre ; mais ces applications directes sont d'ordre nécessairement restreint, et l'utilisation de la chaleur naturelle due au soleil ne sera traitée que tout à fait incidemment dans cet ouvrage.

Il n'en est pas de même des combustibles qui, sous la forme de produits végétaux ou de produits fossiles, constituent la source la

plus ordinaire et pour ainsi dire la seule à laquelle l'industrie et l'économie domestique vont demander la chaleur dont elles ont besoin. La combustion n'est d'ailleurs qu'une combinaison chimique, et les combinaisons, lorsqu'elles s'effectuent, produisant en général de la chaleur, on pourrait utiliser la production d'une combinaison quelconque ; mais la combustion est, de toutes les actions chimiques, la seule qui se prête à toutes les conditions d'emploi de la chaleur ; c'est aussi la seule qui permette de l'obtenir en abondance et au plus bas prix.

Nous n'aurons pas à considérer les conditions dans lesquelles la chaleur pourrait être obtenue sous l'influence des actions mécaniques ou de l'électricité ; bien que cette origine présente une importance capitale au point de vue de la théorie mécanique de la chaleur et d'une façon générale au point de vue de la démonstration du principe moderne de la conservation absolue de la force dans l'univers, elle ne présente que des applications très-rares et toutes particulières dont nous n'avons pas à parler.

Nous ne nous occuperons donc que de la combustion comme moyen de produire la chaleur.

CHAPITRE PREMIER

De la combustion en général.

1. La combustion réside uniquement dans le fait de la combinaison d'un corps avec l'oxygène ; ce phénomène est en général accompagné d'un développement de chaleur, et quand ce développement est suffisant et suffisamment rapide, la température du corps s'élève jusqu'à l'incandescence, et il y a alors dégagement de lumière. Toutefois certaines combinaisons oxygénées ne se forment qu'en absorbant de la chaleur, c'est le cas du protoxyde d'azote et de l'oxyde d'argent ; ces exceptions sont d'ailleurs fort rares.

2. L'oxygène est un corps gazeux, incolore, sans odeur ni saveur ; il jouit de toutes les propriétés de l'air atmosphérique, dont il forme un des éléments. L'air est composé, en volumes, de 79 parties d'azote et de 21 d'oxygène. L'azote ne joue qu'un rôle passif dans les phénomènes de la combustion ; pour cette raison, nous n'en décrirons point les propriétés, dont la connaissance n'est pas nécessaire pour l'objet que nous nous proposons.

3. L'oxygène jouit de la propriété remarquable de se combiner avec tous les corps simples, et avec un grand nombre de corps composés. Tous ces corps portent alors le nom de combustibles.

4. L'affinité des différents corps combustibles pour l'oxygène est extrêmement variable ; il en est qui absorbent ce gaz à la température ordinaire, d'autres exigent une température plus élevée ; d'autres enfin ne peuvent se combiner avec l'oxygène que lorsqu'il se dégage à l'état naissant d'une combinaison.

5. L'oxygène peut être mis en contact avec un corps combustible de bien des manières différentes : on peut, en effet, produire la combustion des corps par l'air, par l'oxygène pur ou mêlé avec d'autres gaz, et même par des combinaisons solides ou liquides qui contiennent de l'oxygène. Dans tous les cas, il se forme une combinaison du corps combustible et de l'oxygène. Quand la combustion d'un corps a lieu dans l'air, c'est ce dernier qui fournit l'oxygène nécessaire ; si le volume dans lequel s'opère la combustion est petit relativement au poids du combustible, l'oxygène est bientôt épuisé, et la combustion cesse ; aussi l'air doit-il être constamment renouvelé. Quand un métal est dissous par un acide, le métal éprouve une véritable combustion, et c'est l'acide ou l'eau qui, en se décomposant, fournit l'oxygène nécessaire. Enfin, dans la détonation de la poudre, les matières combustibles qu'elle renferme, le soufre et le charbon, éprouvent encore une combustion réelle, pour laquelle l'oxygène est fourni par le salpêtre.

6. Il résulte évidemment de ce qui précède, que le produit de la combustion doit être plus pesant que le corps combustible, de tout l'oxygène absorbé. Mais les produits de la combustion peuvent être solides, liquides ou gazeux. Dans les deux premiers cas, le résidu de la combustion en est tout le produit, et on reconnaît facilement qu'il y a augmentation de poids. Dans le dernier cas, les produits se dégagent à mesure qu'ils se forment, et le résidu est uniquement formé des substances incombustibles qui existaient dans la matière brûlée. C'est ainsi, par exemple, qu'en brûlant du plomb dans un vase d'argile ou de fonte, on obtient pour produit une matière grise beaucoup plus pesante que le plomb employé ; tandis que, dans la combustion du bois ou du charbon, il ne reste pour résidu que les matières étrangères qui étaient contenues dans ces combustibles. Ainsi, il faut bien distinguer les produits des résidus de la combustion. Les produits sont des combinaisons d'oxygène et des corps combustibles, dont le poids excède toujours celui de ces derniers,

mais qui restent avec le résidu, ou se dégagent, suivant qu'ils sont solides ou gazeux.

7. Nous avons déjà dit que la chaleur et la lumière accompagnent ordinairement la combustion dans l'air. Il paraît qu'en général la lumière ne commence à se manifester qu'autant que la température du corps est au moins à 400°. A cette température la lumière est d'un rouge obscur à peine visible; mais à mesure que la température augmente, la lumière prend plus d'éclat, elle devient rouge-cerise, et presque complétement blanche à une température très-élevée.

8. Lorsqu'un combustible est solide, et reste tel, quelle que soit sa température, pendant toute la durée de la combustion, ce phénomène n'a lieu qu'à la surface du combustible, et cette surface seule est lumineuse. L'air environnant, quoique soumis à une température très-élevée, n'est point lumineux, les gaz n'ayant qu'un très-faible pouvoir rayonnant. Ainsi, le charbon privé d'autres matières combustibles n'est lumineux qu'à sa surface. La flamme qu'il produit ordinairement, du moins au commencement de sa combustion, est due à une certaine quantité d'hydrogène, qu'il renferme toujours, et à l'eau que le charbon a absorbée par son contact avec l'air, et qui se décompose à une haute température.

9. Mais si le corps combustible est susceptible de se réduire en vapeur à une température inférieure à celle qui se développe dans la combustion, la combustion s'effectuera sur la vapeur elle-même. Le lieu de la combustion sera un espace situé au-dessus du combustible; car toutes ces vapeurs, à la température élevée à laquelle elles se trouvent, sont plus légères que l'air. Cet espace lumineux, que l'on appelle flamme, aura une forme qui dépendra à la fois de la direction et de la vitesse du courant de vapeur et du courant d'air. Si le corps combustible, au lieu de se réduire en vapeurs, se décompose et dégage des gaz combustibles, comme, par exemple, le bois, la houille, les huiles, ces gaz en brûlant donneront lieu au même phénomène.

10. La flamme est réellement produite par la combustion des gaz, ainsi qu'il est facile de le reconnaître par expérience. En effet, si l'on éteint une chandelle de manière que la mèche conserve encore quelques points en ignition, il se dégage un filet de fumée épaisse et très-odorante; si l'on approche un corps enflammé de cette fumée, elle s'enflamme, la combustion se propage rapidement de haut en bas jusqu'à la mèche, la flamme de la chandelle redevient ce

qu'elle était d'abord, et la fumée cesse. On peut même brûler cette fumée à une certaine distance de la mèche, et empêcher la combustion de se propager jusqu'à elle; pour cela, il suffit de placer une toile métallique un peu au-dessus de la mèche, et d'enflammer le gaz qui passe à travers; on obtient ainsi une flamme et de la fumée au-dessous. Mais, pour produire cet effet, il faut que le tissu soit d'autant plus serré que le gaz dont on veut arrêter la flamme est plus combustible. Cette propriété singulière des toiles métalliques a été attribuée par Davy au refroidissement qu'elles produisent dans la flamme.

11. Pour qu'une flamme soit très-brillante, il faut qu'elle renferme des matières solides; et pour cela il faut, ou qu'il y ait des corps solides en permanence, ou que le gaz, avant de brûler, en dépose, ou enfin que le produit de la combustion soit solide. Toutes les combustions de gaz qui ne satisfont pas à l'une ou à l'autre de ces conditions, ont lieu avec une faible lumière. Ainsi, la combustion de l'hydrogène pur ou du soufre donne une flamme peu brillante, parce que le produit de la combustion de l'hydrogène est de la vapeur d'eau, et que celui du soufre est de l'acide sulfureux gazeux. Mais les flammes du phosphore, de l'arsenic, de l'hydrogène carboné, ont un grand éclat, parce que la combustion des deux premiers produit des corps solides, et que celle de l'hydrogène carboné est précédée d'un dépôt de charbon. De même, quand on environne les flammes peu brillantes par leur nature, comme celle de l'hydrogène, d'un réseau de fil de platine, le métal prend un grand éclat, et le gaz en brûlant produit beaucoup de lumière. Ces faits s'expliquent facilement en considérant que les gaz ont un très-faible pouvoir rayonnant, tandis que les corps solides rayonnent beaucoup à une température élevée.

12. La flamme n'est lumineuse qu'à sa surface, parce que c'est là seulement que le gaz combustible brûle en contact avec l'air; il est d'ailleurs facile de s'en assurer en plaçant une toile métallique en travers de la flamme d'une chandelle; le tissu métallique intercepte la flamme, et en regardant au-dessus de la toile, on voit la partie centrale de la flamme complétement noire.

13. La longueur de la flamme est le chemin parcouru par une tranche transversale du gaz, pendant que la combustion se propage de la circonférence au centre de cette tranche. Elle a évidemment d'autant plus d'étendue, que l'air se renouvelle avec moins de vitesse. On peut reconnaître l'influence de la vitesse du courant d'air sur

l'étendue de la flamme au moyen d'une lampe à cheminée : si l'on augmente la longueur de la cheminée avec un cylindre de papier de même diamètre, circonstance qui augmente la vitesse du courant d'air, la hauteur de la flamme diminue; si l'on réduit la longueur de la cheminée ou si l'on rétrécit son ouverture, circonstances qui diminuent la vitesse du courant, la flamme s'allonge. Il résulte de là une conséquence très-importante dans les arts : on peut, à volonté, allonger ou raccourcir la flamme, en diminuant ou en augmentant le tirage.

14. Lorsque des gaz combustibles partent d'une très-grande surface d'un corps en ignition, ils ne peuvent jamais brûler complétement, du moins quand on n'emploie pas un moyen particulier pour augmenter la vitesse du courant d'air, parce que la partie centrale de la colonne de gaz se trouve à une température trop basse lorsqu'elle arrive en contact avec l'air. C'est pourquoi, jusqu'à la découverte d'Argant, on ne pouvait employer dans les lampes que des mèches d'un très-petit diamètre, et par suite on ne pouvait obtenir que des foyers de faible intensité. Mais avec l'emploi des becs annulaires, simples ou multiples, à cheminées, dans lesquels l'air est appelé à l'intérieur et à l'extérieur de la mèche, et où la vitesse du courant se trouve accélérée par le tirage de la cheminée, on est parvenu à obtenir des foyers d'une intensité beaucoup plus considérable, une combustion sans fumée et un effet utile des huiles beaucoup plus grand que dans les anciens appareils.

15. La flamme a naturellement une direction verticale de bas en haut, à cause de la haute température des gaz; mais cette direction est modifiée par celle du courant d'air; la flamme peut être inclinée d'une manière quelconque; elle peut être rendue horizontale, et même dirigée de haut en bas.

16. La combustion des corps gazeux dans l'air se produit mieux que celle des corps solides; c'est ce qu'on voit par la couleur et l'éclat de la flamme, éclat que l'on ne peut produire sur les corps solides qu'à l'aide d'une combustion alimentée par un courant d'air forcé, ou par l'oxygène pur; il en résulte une température très-élevée de la flamme. On s'assure directement de ce fait en y plongeant des corps solides d'une petite dimension; ils prennent un éclat qui ne peut être produit que par une température extrêmement élevée.

17. Les gaz, pour s'enflammer, exigent une température plus ou moins haute, suivant leur nature. Il en est qui s'enflamment dans

l'air à la température ordinaire : tel est le gaz hydrogène phosphoré. D'autres exigent une température plus élevée que le rouge-cerise : tels sont la plupart des gaz produits par les combustibles employés dans le chauffage et l'éclairage; tout le monde sait en effet qu'un corps au rouge-cerise ne peut pas allumer la fumée d'une lampe, d'une chandelle, du bois, etc.

18. Quand la combustion d'un corps quelconque, solide, liquide ou gazeux, est complète, la quantité de chaleur dégagée est, comme nous le verrons plus tard, toujours la même pour la même quantité du même combustible, quelles que soient les circonstances de la combustion; elle est la même quand la combustion s'effectue avec de l'air, sous une pression plus grande ou plus petite que celle de l'atmosphère, quand l'oxygène est en quantité plus ou moins grande dans l'air, et même quand la combustion a lieu dans l'oxygène pur. La lumière, au contraire, pour le même combustible et la même consommation dans le même temps, varie avec les circonstances qui accompagnent la combustion, et surtout avec la vitesse du courant d'air.

19. Pour que la flamme d'un gaz combustible soit la plus brillante possible, il faut que sa température soit très-élevée, et par conséquent que le courant d'air qui alimente la combustion soit très-rapide. Mais à mesure qu'elle augmente en éclat, elle perd en étendue, de sorte qu'il arrivera un moment où sa faculté éclairante diminuera. Il y a dans chaque cas particulier une vitesse du courant d'air qui donne le maximum de pouvoir lumineux : c'est celle qui amène sur la flamme une quantité d'air seulement suffisante pour effectuer complétement la combustion. Dans le cas où l'air serait mélangé avec le gaz, la combustion serait immédiatement complète, et quoiqu'on obtienne alors le maximum de la température que peut produire le gaz combustible, la flamme cesse d'être éclairante, elle brûle *bleu*, c'est qu'en effet il n'y a plus alors de substance solide dans la flamme, partant plus de rayonnement et par suite plus d'éclat.

20. Nous n'entrerons pas maintenant dans de plus grands développements sur la combustion; mais en parlant de chacun des combustibles qui sont employés dans les arts, nous étudierons les circonstances particulières que présente leur combustion, ainsi que les produits qu'elle fournit.

CHAPITRE II

Des combustibles en général.

21. *Calorie.* — *Puissance calorifique.* — Nous désignerons désormais sous le nom d'*unité de chaleur* ou *calorie*, la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau, et nous appellerons *puissance calorifique* d'un combustible, le nombre d'unités de chaleur qu'un kilogramme de ce corps produit par sa combustion complète.

La première définition suppose nécessairement que la chaleur spécifique de l'eau est constante, ce qui est très-sensiblement vrai; la seconde suppose que le même poids d'un même combustible produit toujours en brûlant la même quantité de chaleur, quelles que soient les circonstances dans lesquelles se fait la combustion : c'est un fait également constaté par l'expérience.

22. *Méthodes employées pour déterminer la puissance calorifique des combustibles.* — Rumford est le premier physicien qui se soit occupé de la détermination de la puissance calorifique des combustibles. L'appareil dont il s'est servi est décrit dans tous les traités de physique. Il consiste en une caisse de cuivre rouge de peu de hauteur, dans laquelle circule un serpentin, terminé à un bout par un entonnoir renversé placé au-dessous de la caisse, et à l'autre par un tuyau vertical qui s'élève à une certaine hauteur. Pour se servir de cet appareil, on remplit la caisse d'eau à une certaine température, et on fait passer dans le serpentin la fumée du combustible que l'on brûle sous l'entonnoir; alors, connaissant le poids du combustible brûlé, le poids de l'eau renfermée dans la caisse, son accroissement de température, le poids et la capacité calorifique de la matière dont la caisse est formée, on peut trouver facilement la puissance calorifique du combustible brûlé.

L'emploi du calorimètre de Rumford, indépendamment de la correction relative au refroidissement de l'appareil, en exigerait encore d'autres non moins importantes : l'une, relative à la quantité de chaleur entraînée par les gaz qui sortent du serpentin ; une autre, relative à la chaleur qui est perdue par le rayonnement du combustible, au-dessous de l'entonnoir, sous lequel la combustion a lieu ; enfin, une dernière, relative aux matières combustibles non brûlées, en-

traînées avec le courant d'air brûlé. Ces corrections n'ont point été faites, de sorte que les résultats obtenus par Rumford sont trop faibles.

23. Laplace et Lavoisier ont fait aussi un grand nombre d'expériences au moyen du calorimètre qui porte leur nom : la chambre intérieure remplie de glace était traversée par un serpentin qui communiquait d'un côté avec un entonnoir sous lequel on brûlait le combustible, et de l'autre avec un tube vertical qui servait de cheminée. La quantité de chaleur produite se mesurait par la quantité de glace fondue.

Hassenfratz s'est servi du même appareil, et les résultats qu'il a obtenus attestent par leur irrégularité les vices de ce mode d'expérience.

24. Depuis, Despretz a fait sur quelques corps des expériences plus exactes. Il s'est servi du calorimètre de Rumford, mais modifié de manière à éviter les causes d'erreur que nous avons signalées. Despretz a obtenu pour la puissance calorifique du carbone le nombre 7914, et pour celle de l'hydrogène 23640. Le premier nombre se rapproche beaucoup de celui qu'ont donné les expériences les plus récentes.

25. On avait admis longtemps que les quantités de chaleur, produites par les différents combustibles simples ou composés, étaient proportionnelles aux quantités d'oxygène absorbées. Cette hypothèse fut appuyée par les expériences de Despretz sur le carbone et l'hydrogène, d'après lesquelles les quantités de chaleur produites sont sensiblement dans le rapport de 1 à 3, qui est aussi celui des poids d'oxygène absorbés par les mêmes poids de ces combustibles.

M. Berthier avait imaginé une méthode très-simple et très-expéditive, pour déterminer la puissance calorifique des combustibles formés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, et qui s'applique facilement aux bois dans différents états de dessiccation et de carbonisation, aux tourbes et aux combustibles fossiles. Cette méthode consiste à évaluer la quantité de plomb produite en calcinant ces matières avec un excès de litharge. Le carbone pur réduisant un poids de litharge correspondant à 34 fois son poids de plomb, on obtenait l'équivalent du combustible en carbone, en divisant par 34 le poids du culot de plomb.

Cette méthode est inexacte, car des quantités égales d'oxygène, en se combinant avec le carbone et l'hydrogène, produisent des quantités inégales de chaleur. Ainsi, nous verrons plus loin que la combus-

tion d'un même poids de carbone et d'hydrogène produit 8080 et 34462 unités de chaleur. Or, les poids d'oxygène absorbés sont 2k,67 et 8 kilogrammes ; par conséquent, un kilogramme d'oxygène, en se combinant avec le carbone et l'hydrogène, produit 3049 et 4307 unités de chaleur, nombres qui sont dans le rapport de 1 à 1,41.

26. Le compte rendu des séances de l'Académie des sciences, t. VII, renferme un extrait des registres de Dulong, où se trouvent les résultats de ses expériences sur les quantités de chaleur développées par la combustion d'un grand nombre de corps. Nous ne rapporterons que les résultats qui nous intéressent :

Hydrogène	34742
Carbone	7170
Oxyde de carbone	2488
Hydrogène protocarboné	13205
Hydrogène bicarboné	12032
Soufre	2601
Éther sulfurique	9430
Essence de térébenthine	10836
Huile d'olive	9862
Alcool	6855

Il résulte aussi des expériences de Dulong, que la quantité de chaleur produite par la combinaison d'un litre d'oxygène avec différents corps n'est pas constante, comme on l'avait supposé ; car elle est avec

L'hydrogène, de	6172
Le gaz des marais, de	4793
Le carbone, de	3929
Le fer, de	6216
Le cuivre, de	3720
Le cobalt, de	5721

27. Enfin, la question de la puissance calorifique des combustibles a été reprise par MM. Favre et Silbermann (*Annales de Physique et de Chimie*, 3e s., t. XXXIV). La disposition ingénieuse des appareils, les moyens employés pour tenir compte de toutes les causes d'erreur, le soin avec lequel les produits de la combustion ont été recueillis et analysés, et enfin la concordance des résultats dans les expériences relatives à un même corps, placent ce beau travail bien au-dessus de ceux qui avaient été publiés sur cette importante question, et ne permettent pas de douter de la grande précision des nombres obtenus. Les questions examinées par MM. Favre et Sil-

bermann sont beaucoup plus nombreuses que celles que M. Dulong avait essayé de résoudre ; pour celles qui sont communes, les résultats, comme nous allons le voir, diffèrent peu, excepté pour le carbone ; il est très-probable que cette différence provient de l'oxyde de carbone, qui se forme toujours en quantité plus ou moins considérable, et que M. Dulong avait négligé.

28. Nous ne pouvons pas décrire ici dans tous ses détails l'appareil employé par MM. Favre et Silbermann : nous nous bornerons à en indiquer les dispositions principales.

L'appareil est formé de trois vases cylindriques concentriques, que nous désignerons par les lettres A,B,C; le cylindre intérieur A est rempli d'eau distillée; l'intervalle des cylindres A et B est rempli par une peau de cygne garnie de son duvet, matière qui conduit très-mal la chaleur; et l'intervalle des vases B et C est rempli d'eau qu'on maintient à la température extérieure. La chambre de combustion est un vase fixé au centre du vase A, par conséquent environné d'eau, et où la combustion des corps s'effectue par l'oxygène pur, à l'aide de dispositions différentes, suivant l'état et la nature des corps. Les gaz produits par la combustion s'échappent à travers un long serpentin qui entoure la chambre de combustion, et dans lequel ces gaz prennent la température de l'eau. Ils passent ensuite dans les appareils destinés à les recueillir. Si le vase A, qui renferme l'eau dans laquelle passe toute la chaleur produite, ne se refroidissait pas, la puissance calorifique du combustible s'obtiendrait avec une grande facilité ; mais pendant toute la durée de l'expérience une partie de la chaleur qui s'accumule dans l'eau passe à travers le duvet de cygne pour pénétrer dans l'enveloppe extérieure d'eau. Cette quantité de chaleur doit être mesurée et ajoutée à celle qui produit l'élévation de température de l'eau du vase A. Pour la déterminer, on a fait des expériences directes sur le refroidissement de ce vase A ; on a reconnu que son refroidissement jusqu'à 10° était proportionnel à l'excès de sa température sur celle de l'enveloppe d'eau contenue entre les vases B et C, et qu'il était égal à 0°,002 pour un excès de température de 1° pendant une minute ; d'après cela, connaissant à des époques rapprochées, pendant la durée de la combustion, les températures simultanées du vase A et de l'enveloppe d'eau, il était facile de calculer la correction dont il s'agit.

29. Voici, d'après le remarquable travail de MM. Favre et Silbermann, les puissances calorifiques des corps les plus importants pour l'objet qui nous occupe :

Hydrogène	34662
Charbon de bois fortement calciné	8080 (1)
Charbon de sucre	8039
Charbon des cornues à gaz	8047
Graphite des hauts fourneaux	7762
Graphite naturel	7796
Diamant	7770
Oxyde de carbone	2403
Hydrogène protocarboné	13063
Hydrogène bicarboné	11857
Éther sulfurique	9027
Alcool	7183
Essence de térébenthine	10852
Soufre	2240
Sulfure de carbone	3400
Cire	10496

En comparant ces nombres avec ceux du tableau de Dulong (26), on voit qu'il n'y a de différence marquée, comme nous l'avons déjà dit, que pour le carbone.

30. Les combustibles employés dans l'industrie, les bois, la tourbe, les houilles, étant composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, il est important de vérifier si, comme l'avait indiqué M. Dulong, leur puissance calorifique est égale à la somme de celles des éléments qui les constituent, en retranchant toutefois de la portion d'hydrogène celle qui formerait de l'eau avec l'oxygène du combustible. *A priori*, il est facile de voir que cette loi ne peut pas être rigoureusement exacte, car la puissance calorifique du carbone dépend de son état de cohésion, et on ne peut pas considérer un composé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène comme formé d'eau, d'hydrogène et de carbone ; d'ailleurs, si l'on compare les résultats trouvés par MM. Favre et Silbermann avec ceux qu'on obtient par le calcul en appliquant la règle de Dulong, il est facile de voir que la connaissance de la composition immédiate d'un combustible ne suffit pas pour en calculer la puissance calorifique.

Dans le tableau suivant se trouvent un certain nombre de corps combustibles avec l'indication de leur composition, de leur puissance calorifique déterminée expérimentalement ou par le calcul et enfin la différence entre la première et la seconde de ces deux quantités.

(1) Sans tenir compte de l'oxyde de carbone formé, la puissance calorifique serait seulement de 7833.

NOMS des SUBSTANCES.	COMPOSITION			HYDROGÈNE libre.	PUISSANCE CALORIFIQUE		DIFFÉRENCES.
	Oxygène.	Hydrogène.	Carbone.		Observée.	Calculée.	
Gaz oléfiant.....		0,143	0,857	0,143	11857	11771	+ 86
Amylène.....		—	—	—	11491	—	—280
Paramylène.....		—	—	—	11303	—	—468
Carbure bouillant à 180°		—	—	—	11262	—	—509
Cétène.....		—	—	—	11055	—	—716
Métamylène.....		—	—	—	10928	—	—843
Acide acétique.....	0,533	0,067	0,400	0,000	3505	3200	+305
Formiate de méthyle..	—	—	—	—	4197	—	+997
Acétate de méthyle...	0,432	0,081	0,487	0,027	5342	4822	+520
Formiate d'éthyle.....	—	—	—	—	5278	—	+456
Acide butyrique.....	0,364	0,089	0,547	0,045	5647	5927	—280
Acétate d'éthyle.....	—	—	—	—	6292	—	+365
Acide valérique.....	0,314	0,09	0,588	0,059	6439	6729	—280
Butyrate de méthyle..	—	—	—	—	6798	—	+ 69
Acétone.....	0,276	0,103	0,621	0,069	7303	7338	— 35
Butyrate d'éthyle.....	—	—	—	—	7090	—	—280
Valérate de méthyle..	—	—	—	—	7375	—	+ 37
Valérate d'éthyle.....	0,216	0,107	0,647	0,077	7834	7815	+ 19
Acétate d'amyle.....	—	—	—	—	7971	—	+156

Dans ce tableau, les corps ont été rangés par groupes de composés isomères, c'est-à-dire ayant la même composition, et il suffit d'examiner la colonne des différences pour voir que des corps ayant même composition n'ont pas même puissance calorifique. Pour les carbures d'hydrogène qui commencent la série, on voit qu'entre le gaz oléfiant et le métamylène, la différence des puissances calorifiques est de 929 calories, à peu près un douzième de la valeur de la puissance calorifique. Entre l'acide acétique et le formiate de méthyle, la différence est de 692 calories, à peu près un cinquième de la valeur de la puissance calorifique du premier. Les autres groupes fournissent des différences de même ordre; il s'ensuit que la composition ne suffit pas pour déterminer d'une façon précise la puissance calorifique d'un corps et que la règle de Dulong ne pourra fournir qu'une première approximation pouvant différer considérablement de la valeur vraie soit en plus, soit en moins.

En étudiant séparément chacune des espèces de combustibles industriels, nous indiquerons d'après quelles considérations, on peut, pour chacun d'eux, arriver à déterminer, à très-peu près, la valeur de la puissance calorifique.

31. Nous admettrons que la quantité de chaleur développée est la même quand la combustion complète a lieu immédiatement, ou lorsqu'elle s'effectue successivement. Ainsi, par exemple, le carbone donnera le même résultat calorifique total, soit qu'il forme directement de l'acide carbonique, soit qu'il produise d'abord de l'oxyde de carbone, et qu'on n'obtienne de l'acide carbonique que par une seconde combustion. Ce principe a été démontré par M. Hess, du moins pour la combinaison de l'eau et de l'acide sulfurique, et pour la chaux ; et tout porte à croire qu'il se vérifierait dans les autres combinaisons.

Il résulte de ce principe que, quand le charbon passe d'abord à l'état d'oxyde et ensuite à l'état d'acide, quoique la quantité d'oxygène absorbé dans ces deux transformations soit exactement la même, la quantité de chaleur émise dans la seconde partie de la combustion est beaucoup plus grande que dans la première. En effet, l'oxyde de carbone étant formé de 0,428 de carbone et de 0,572 d'oxygène, 1 kilogramme de carbone produit $1 : 0{,}428 = 2^k\,333$ d'oxyde de carbone qui, par leur combustion, produisent $2{,}333.2403 = 5607$ unités de chaleur, et par conséquent le carbone, en se transformant en oxyde de carbone, développe seulement $8080 - 5607 = 2473$ unités.

32. Si, comme le fait M. Thomson, on admet que la puissance calorifique d'un combustible est proportionnelle à la quantité d'oxygène qu'il absorbe pour brûler (Loi de Welter) à la condition que le phénomène soit simple, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas lieu de considérer une décomposition ou un changement d'état du combustible dans la combustion, on arrive à supposer que si le charbon était à l'état gazeux, 1 kilogramme de ce corps devrait donner en se réduisant en oxyde de carbone la même quantité de chaleur que celle que fournit la quantité d'oxyde de carbone qui renferme 1 kilogramme de carbone en se transformant en acide carbonique, et par suite la puissance calorifique du carbone gazeux serait $5607 \times 2 = 11214$; cette considération permet d'expliquer l'excès de la puissance calorifique observée sur la puissance calculée dans un certain nombre de cas. Mais il ne faut voir dans cette détermination qu'un fait purement hypothétique et qui ne s'appuie sur aucune donnée réellement expérimentale.

33. Nous admettrons encore que la quantité de chaleur développée par un combustible est indépendante de la température du corps et de celle de l'air. Cette loi, d'après M. Hess, aurait été vérifiée par M. Dulong.

34. Enfin nous admettrons que la quantité de chaleur développée par la combustion complète est indépendante de la pression du gaz comburant et de la proportion d'oxygène qu'il renferme, du moins dans les limites où la combustion peut s'effectuer. Cette loi a été vérifiée par Despretz. Ce physicien a trouvé la même puissance calorifique pour le carbone brûlé dans l'air et dans l'oxygène pur.

35. Il y a une remarque très-importante à faire sur l'emploi de la puissance calorifique de l'hydrogène : le nombre 34462 est obtenu en supposant que l'eau, produit de la combustion du gaz, est ramenée totalement à l'état liquide; or dans les conditions ordinaires de la combustion quand l'hydrogène brûle dans l'air, il n'y a pas condensation de la vapeur d'eau formée, cette vapeur reste à l'état gazeux mélangée avec l'azote de l'air et l'oxygène en excès; il en résulte que la puissance calorifique doit être diminuée de la chaleur latente de vaporisation de l'eau formée ; or 1 kilogramme d'hydrogène forme 9 kilogrammes d'eau dont la chaleur latente à la température de 0° est 606,5 ; il en résulte qu'il faut retrancher de 34462, le produit $9 \times 606{,}5 = 5458{,}5$. Ce qui donne en nombre rond 29000 pour puissance calorifique de l'hydrogène.

36. *Chaleur rayonnée.* — Lorsqu'un corps est en combustion, la chaleur produite se dissipe de deux manières différentes : 1° par le courant d'air qui se forme naturellement autour de lui ; 2° par le rayonnement.

Le courant d'air est dû à la combustion même. L'air en contact avec le corps incandescent s'échauffe, se dilate et s'élève ; il est remplacé par de l'air froid qui, après avoir alimenté la combustion, s'élève à son tour. Quant à la seconde cause de déperdition de la chaleur, elle résulte d'une propriété générale des corps échauffés.

37. Pendant longtemps on a fait peu d'attention au rayonnement des combustibles, parce qu'on le regardait comme très-faible. Pour faire voir qu'en effet le rayonnement ne dissipe qu'une très-petite partie de la chaleur produite, on a comparé la chaleur qu'on éprouve en approchant la main de la flamme d'une chandelle, soit latéralement, soit en dessus. Latéralement, on ne reçoit que la chaleur rayonnée ; en dessus, que celle du courant d'air chaud ; or, comme à des distances égales, la différence des températures est très-considérable, on en a conclu que la dispersion de la chaleur par le rayonnement est très-petite, du moins relativement à celle qui est entraînée par le courant d'air. Cette expérience, qui paraît décisive au premier abord, ne peut pas conduire cependant à la consé-

quence qui est généralement admise. En effet, le courant d'air chaud n'a qu'une direction et une section peu différente de celle de la flamme, tandis que le rayonnement a lieu dans tous les sens. Ainsi l'expérience dont nous venons de parler ne prouve rien pour le rayonnement des flammes, et encore moins pour celui des combustibles qui brûlent sans flamme.

38. J'ai essayé de déterminer, au moins approximativement, les quantités de chaleur rayonnée par différents combustibles. Je me suis servi pour cela de l'appareil suivant: ABCD, *abcd* (*fig.* 1), est un vase annulaire en fer-blanc de $0^m,30$ de hauteur et de $0^m,20$ de diamètre intérieur; l'intervalle des deux cylindres est de $0^m,05$; le cylindre intérieur est ouvert par les deux bouts, et le vase est rempli d'eau et supporté par trois pieds; la surface supérieure du vase porte deux tubulures, l'une est destinée à recevoir la tige d'un thermomètre, l'autre la tige d'un agitateur. Au centre du cylindre intérieur dont la surface est recouverte de noir de fumée, est suspendu un petit panier en fil de fer dans lequel on place le combustible en ignition.

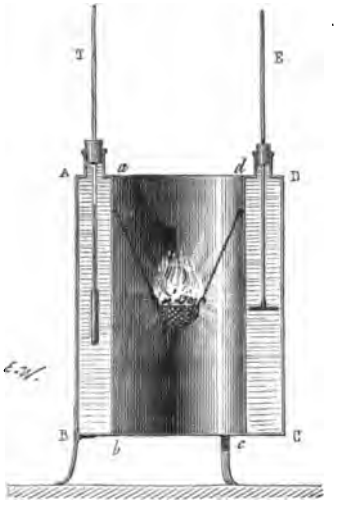


Fig. 1.

Pour se servir de cet appareil, on commence par remplir d'eau l'intervalle des deux cylindres, et on met dans le petit panier un poids connu de combustible; une partie de la chaleur rayonnée est reçue par la surface inférieure *abcd* du vase et passe dans l'eau qu'on a soin d'agiter de temps en temps; quand on juge que l'opération a été suffisamment prolongée, on retire le panier et on le pèse, on obtient alors le poids du combustible brûlé; connaissant le poids de l'eau, celui du métal et sa capacité calorifique, on obtient la quantité de chaleur qui a passé dans le vase. Mais, pour en déduire la quantité de chaleur absorbée par la surface intérieure *abcd*, il faut évidemment ajouter celle que le vase a perdue pendant l'opération. Cette perte de chaleur peut se calculer facilement, en observant pour un certain excès de la température du vase sur celle de l'air extérieur, le temps que le vase met à se refroidir d'un degré, et en admettant que la quantité de chaleur perdue à chaque instant est

proportionnelle à l'excès de sa température sur celle de l'air extérieur; alors, en observant la température de l'eau du vase à des époques suffisamment rapprochées, on obtient aisément une évaluation approchée de la quantité totale de chaleur perdue pendant la durée de l'expérience. La quantité de chaleur absorbée par le cylindre *abcd* étant ainsi connue, pour obtenir la chaleur rayonnée par le combustible, on multipliera la quantité de chaleur absorbée, par le rapport de la surface d'une sphère décrite du milieu du foyer comme centre et passant par les cercles *ad* et *bc*, à la zone sphérique de hauteur *ab*, rapport qui est celui de *ac* à *ab;* dans l'appareil dont je me suis servi, ce rapport était égal à 1,2. Pour faire ces expériences sur la flamme de l'huile, je plaçais au centre du vase annulaire un ou plusieurs becs de lampe alimentés par un réservoir extérieur à niveau constant.

39. D'après ces expériences, en désignant par 1 la quantité totale de chaleur produite, les quantités de chaleur rayonnées sont pour le bois à peu près 0,25 ; pour le charbon de bois 0,50, et pour l'huile, 0,18. Mais ces expériences ne peuvent guère servir qu'à constater que la quantité de chaleur rayonnée par le charbon est très-grande relativement à celle qui est rayonnée par les flammes, attendu que la quantité de chaleur rayonnée par un corps en combustion dépend de l'étendue de la surface libre, et que cette surface varie pour le même combustible avec le volume du corps en ignition et avec sa forme.

40. *Combustibles employés dans l'industrie.* — Les combustibles sont très-nombreux, car cette grande classe de corps renferme, non-seulement presque tous les corps simples, mais encore un grand nombre de corps composés. Cependant le nombre de ceux qui sont en usage dans les arts pour produire de la chaleur est très-peu considérable, parce que, pour être employés, ils doivent satisfaire à plusieurs conditions importantes :

1° Ils doivent être facilement brûlés dans l'air atmosphérique, et la chaleur dégagée par la combustion doit être suffisante pour maintenir celle-ci. Le soufre, le charbon, l'hydrogène, le phosphore, satisfont à cette condition ; mais le fer, le plomb, quoique très-combustibles, n'y satisfont point, car, lorsque ces métaux sont en ignition, si on les enlève du foyer où il a été nécessaire de les placer, la combustion s'arrête. Il n'est pas douteux que cet effet ne provienne de ce que le produit de la combustion, étant solide, forme autour du métal une croûte qui le soustrait au contact de

l'air : cette raison devient plus vraisemblable encore, lorsque l'on considère que dans l'oxygène pur, où la combustion du fer se soutient, la température est assez élevée pour fondre et faire couler l'oxyde de fer à mesure qu'il se forme. Quoi qu'il en soit, il y a des corps très-combustibles, dans lesquels la combustion ne se propage pas d'elle-même dans les circonstances ordinaires, et ceux-là ne peuvent être d'aucune utilité pour produire dans les arts de la chaleur ou de la lumière.

2° Ils doivent être abondants, et leurs prix ne doivent point être trop élevés.

3° Enfin, les produits de la combustion doivent être de nature à ne point altérer les corps qui reçoivent l'action de la chaleur, et à ne pas porter dans l'air des gaz ou des vapeurs qui pourraient avoir une action nuisible sur l'économie animale ou végétale.

Le carbone et l'hydrogène sont les seuls corps simples qui remplissent ces différentes conditions ; et les seules matières combustibles en usage sont celles dont ces deux corps forment les principaux éléments.

41. Les combustibles généralement employés sont :

Le bois,
Le charbon de bois,
La tannée,
La tourbe,
Le charbon de tourbe,
La houille,
Le coke.

On peut y ajouter un certain nombre de corps moins fréquemment employés, tels que le gaz d'éclairage, les goudrons et les huiles de houille, les pétroles, etc.

42. Dans certains cas, la nature du combustible qui peut être employé se trouve fixée par certaines conditions à remplir, et quelquefois on n'en a qu'un seul à sa disposition ; mais, le plus souvent, on a le choix entre plusieurs. Dans tous les cas, il est important de connaître leurs puissances calorifiques, pour calculer les dimensions des appareils, et pour déterminer la quantité qu'on en doit brûler afin de produire l'effet demandé ; et lorsqu'on peut employer plusieurs espèces de combustibles, c'est la connaissance de leurs puissances calorifiques qui, combinée avec leur prix, sert à déterminer celui dont l'emploi est le plus économique.

CHAPITRE III

Des bois.

43. D'après les expériences de MM. Gay-Lussac et Thenard sur les bois desséchés à 100°, la fibre ligneuse est toujours identique dans sa composition, quelle que soit la plante d'où elle provient. Pour le chêne et le hêtre ils ont trouvé 0,5253 et 0,5145 de carbone, 0,4747 et 0,4855 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau.

44. Suivant M. Payen, les bois sont formés : 1° d'une matière qu'il désigne sous le nom de *cellulose*, offrant toujours la même composition, savoir : 0,444 de carbone, et 0,556 d'oxygène et hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau ; 2° d'une matière incrustante dont la composition est variable, suivant la nature du bois, mais qui est plus riche en carbone et qui renferme un petit excès d'hydrogène.

M. Frémy a depuis étudié la nature chimique des bois, et il y a déterminé la présence d'un grand nombre de principes immédiats ; leur nomenclature et l'indication de leurs propriétés seraient sans objet au point de vue de l'étude des bois comme combustibles.

45. M. Eugène Chevandier, ancien élève de l'École centrale, l'un des administrateurs de la compagnie de Saint-Gobain, Chauny et Cirey, a présenté en 1844, à l'Académie des sciences, un travail très-important sur la composition élémentaire des différents bois. C'est de son Mémoire inséré dans le dixième volume des *Annales de chimie et de physique* que nous avons extrait ce qui suit.

Les expériences ont été faites dans le laboratoire de M. Dumas, et sous les yeux de cet habile chimiste. Les différents bois ont été réduits en poudre et desséchés à 140°, avant d'être soumis à l'analyse. Les expériences ont eu lieu sur plusieurs échantillons, et souvent elles ont été répétées. Voici les résultats moyens qui ont été obtenus pour chaque essence de bois.

	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Azote.	Cendres.
Hêtre.....	0,4936	0,0601	0,4269	0,0091	0,0100
Chêne.....	0,4964	0,0592	0,4116	0,0129	0,0197
Bouleau.....	0,5020	0,0620	0,4162	0,0115	0,0081
Tremble.....	0,4937	0,0621	0,4160	0,0096	0,0186
Saule.....	0,4996	0,0596	0,3956	0,0096	0,0337

MENUS BRINS ET BRANCHAGES COMPOSANT LES FAGOTS.

	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Azote.	Cendres.
Hêtre.....	0,5017	0,0612	0,4038	0,0105	0,0177
Chêne.....	0,4996	0,0602	0,4110	0,0100	0,0190
Bouleau.....	0,5124	0,0622	0,4017	0,0105	0,0132
Tremble.....	0,4950	0,0609	0,4043	0,0100	0,0298
Saule.....	0,5154	0,0626	0,3621	0,0141	0,0457

Ces nombres sont très-rapprochés, les chiffres moyens sont :

Pour les bois..	0,4970	0,0606	0,4130	0,0105	0,018
Pour les fagots.	0,5046	0,0614	0,3965	0,0111	0,025

46. D'après les expériences faites par M. Violette, directeur de la poudrerie d'Esquerdes (*Annales de chimie et de physique*, t. XXXIX), le bois, pris sur les diverses parties d'un même arbre et séché à 80°, présente les compositions suivantes :

	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE ET AZOTE.	CENDRES.
Feuilles.....	45,015	6,971	40,910	7,118
Petites branches.. écorce.	52,496	7,312	36,737	3,454
Petites branches.. bois...	48,359	6,605	44,730	0,304
Moyenne branche. écorce.	48,855	6,342	41,121	3,682
Moyenne branche. bois..	49,902	6,607	43,356	0,134
Grosse branche... écorce.	46,871	5,570	44,656	2,903
Grosse branche... bois...	48,003	6,472	45,170	0,354
Tronc..... écorce.	46,767	5,930	44,755	2,657
Tronc..... bois...	48,925	6,460	44,319	0,296
Grosse racine..... écorce.	49,085	6,024	43,761	1,129
Grosse racine..... bois...	49,324	6,286	44,108	0,231
Moyenne racine... écorce.	50,367	6,069	41,920	1,643
Moyenne racine... bois...	47,390	6,259	46,126	0,223
Racine chevelue avec écorce.	45,063	5,036	43,503	5,007

Les feuilles desséchées à 100° ont perdu 60 pour 100 d'eau, et les branches 45.

47. Du tableau qui précède résultent les faits suivants : 1° les éléments constitutifs du bois sont inégalement distribués dans les diverses parties d'un même arbre; 2° les feuilles et les racines chevelues ont à peu près la même composition ; 3° le bois a sensiblement la même composition dans toutes les parties du même arbre ; 4° les feuilles et les racines extrêmes renferment moins de carbone que l'écorce et le bois ; 5° les feuilles et les racines extrêmes con-

tiennent beaucoup plus de matières minérales que les autres parties de l'arbre, et toutes les écorces en contiennent plus que le bois.

48. La composition moyenne du bois du tronc et des branches moyennes est un peu inférieure à celle qui résulte des expériences de M. Chevandier ; la différence provient probablement de ce que, dans ces deux séries d'expériences, les bois ont été séchés à des températures différentes.

49. Nous admettrons désormais, comme résultat moyen des analyses que nous venons de rapporter, que les bois desséchés à 140° contiennent 0,50 de carbone, 0,06 d'hydrogène, 0,41 d'oxygène, 0,01 d'azote et 0,02 de cendres ; ou 0,50 de carbone, 0,01 d'hydrogène libre, 0,46 d'oxygène et d'hydrogène dans le rapport nécessaire pour faire de l'eau, 0,01 d'azote et 0,02 de cendres.

50. *Densité du bois.* — La densité du bois, comme celle de tous les corps poreux, peut être considérée de deux manières différentes. On peut considérer la densité du bois sous son volume apparent ; alors la seule méthode qu'on puisse employer pour la déterminer consiste à former avec le bois un prisme dont on puisse facilement mesurer le volume, et à en prendre le poids ; le rapport de ce poids au poids du même volume d'eau, serait la densité cherchée ; cette densité pour le même bois varie nécessairement avec son état hygrométrique et avec la forme et la position des fibres dans l'échantillon choisi. Le tableau suivant dû à Brisson renferme la densité d'un certain nombre de bois :

Grenadier	1,35	Cerisier	0,75
Gaïac, ébène	1,33	Oranger	0,70
Buis de Hollande	1,32	Coignassier	0,70
Chêne de 60 ans (le cœur)	1,17	Orme (le tronc)	0,67
Neflier	0,94	Noyer de France	0,67
Olivier	0,91	Poirier	0,66
Buis de France	0,91	Cyprès d'Espagne	0,64
Mûrier d'Espagne	0,89	Tilleul	0,60
Hêtre	0,85	Coudrier ou noisetier	0,60
Frêne (le tronc)	0,84	Saule	0,58
Aune	0,80	Thuya	0,56
If d'Espagne	0,80	Sapin mâle	0,55
Pommier	0,79	Sapin femelle	0,49
If de Hollande	0,78	Peuplier	0,38
Prunier	0,78	Peuplier blanc d'Espagne	0,32
Érable	0,75	Liége	0,24

D'après ce que je viens de dire, les nombres de ce tableau ne peuvent être considérés que comme des valeurs approchées.

51. On peut aussi se proposer de déterminer la densité de la fibre ligneuse qui forme le bois. M. Violette a fait un grand nombre d'expériences à ce sujet; voici la méthode qu'il a employée en dernier lieu : le bois réduit en poudre très-fine au moyen de la lime, était desséché à 100°, puis placé dans un flacon plein d'eau, dans lequel on faisait le vide : le bois restait sous l'eau dans le vide pendant six jours. En désignant par P le poids du flacon plein d'eau avant l'introduction du bois, par P′ le poids du flacon également plein d'eau à la fin de l'opération, par π le poids du bois introduit, et enfin par δ la densité du bois, on a évidemment :

$$P' = P + \pi - \frac{\pi}{\delta}; \quad \text{d'où} \quad \delta = \frac{\pi}{\pi + P - P'}.$$

M. Violette a trouvé ainsi que tous les bois avaient exactement la même densité et qu'elle était égale à 1,50. Pour les bois de fer, de chêne, de bourdaine et de peuplier, les variations extrêmes sont comprises entre 1,51 et 1,52.

52. Lorsqu'un bois est soumis à l'action de la chaleur, il prend une quantité d'eau qui augmente avec la température. D'après M. Violette, le bois vert, exposé à la température de 100°, perd 45 pour 100 de son poids. D'après le même ingénieur, des échantillons de mêmes dimensions (prismes de $0^m,20$ de longueur et d'un centimètre carré de base), et de différents bois, provenant de bûches conservées en magasin depuis deux ans, exposés pendant deux heures à la vapeur surchauffée, ont donné les résultats suivants :

TEMPÉRATURES de la DESSICCATION.	PERTES POUR 100 PARTIES.			
	CHÊNE.	FRÊNE.	ORME.	NOYER.
125°.....	15,26	14,78	15,32	15,55
150.....	17,93	16,19	17,02	17,43
175.....	32,13	21,22	36,94	21,79
200.....	35,80	27,51	33,38	41,77
225.....	44,31	33,38	40,56	36,56

Ainsi pour chaque bois la perte augmente avec la température; les anomalies que présentent l'orme et le noyer à 200° doivent être considérées comme des erreurs d'observation. Mais à 200°, le bois

est visiblement altéré, et cette décomposition commence probablement à une température moins élevée ; ainsi les pertes observées ne peuvent pas être attribuées entièrement à l'eau hygrométrique. On ne sait pas à quelle température il faudrait soumettre le bois, pour lui enlever, sans l'altérer, toute l'eau hygrométrique qu'il contient ; on pensait que, pour obtenir ce résultat, une température de 100° était suffisante ; mais l'action de la fibre ligneuse sur l'eau élève certainement la température, à laquelle cette eau peut se transformer en vapeur.

53. Les bois verts renferment des quantités d'eau assez inégales. Une analyse directe des bois de charbonnage a donné les résultats suivants :

Eau hygrométrique.....	0,275
Carbone.....	0,375
Oxygène et hydrogène.....	0,338
Cendres.....	0,012

54. D'après M. Leplay (*Annales des mines*, tome III, 5^{me} série), la quantité d'eau hygrométrique renfermée dans les bois serait beaucoup plus considérable. D'après cet ingénieur, au moment de l'abattage, la proportion d'eau est rarement inférieure à 0,45 ; dans les forêts de l'Europe centrale, les bois coupés pendant l'hiver retiennent encore à la fin de l'été plus de 0,40 d'eau ; cette proportion d'eau est souvent réduite à 0,33, quand ils sont employés dans les usines, et dans l'économie domestique ; et enfin les bois conservés pendant plusieurs années dans un lieu sec retiennent encore de 0,15 à 0,20 d'eau. Il est très-probable que les différences relatives à l'état hygrométrique du bois, indiquées par différents ingénieurs, proviennent de ce que la température à laquelle les bois ont été soumis, la grosseur des morceaux et la durée de la dessiccation n'étaient pas les mêmes.

Lorsque le bois a été fortement desséché et qu'il est exposé à l'air dans les circonstances ordinaires, il prend à peu près 5 pour 100 d'eau pendant les trois premiers jours, et il continue à en absorber jusqu'à ce qu'il en contienne 14 à 16 pour 100 ; alors il devient très-hygrométrique, il perd ou absorbe de l'eau suivant l'état de sécheresse ou d'humidité de l'air.

55. Sous le rapport de leur emploi comme combustibles, on divise les bois en deux classes. La première comprend les bois durs et compactes, ceux dont la pesanteur spécifique est la plus considé-

rable : tels sont le chêne, le hêtre, l'orme, le frêne, etc. ; la seconde renferme les bois blancs, mous, légers : tels sont le pin, le sapin, le bouleau, le tremble, le peuplier, etc.

En France, on divise les bois de chauffage en bois neufs, bois flottés, et bois pelards. Le *bois neuf* est celui qui a été transporté au lieu de la consommation en voiture ou en bateau ; le *bois flotté*, celui qui a été transporté en trains flottants ; enfin, le *bois pelard* n'est autre que le bois de chêne écorcé.

56. Les bois humides donnent, sous le même poids, beaucoup moins de chaleur que ceux qui sont secs : 1° parce que l'eau, n'étant point combustible, ne peut point développer de chaleur ; 2° parce que ce liquide en absorbe une grande quantité pour se réduire en vapeur. C'est le comte de Rumford qui, le premier, a appelé l'attention sur le mauvais usage des bois humides.

Il est tellement avantageux d'employer des bois secs, que dans plusieurs espèces d'usines, on ne se contente pas de n'admettre que des bois aussi secs qu'ils peuvent l'être naturellement par la dessiccation à l'air ; on les fait encore sécher dans des étuves. Telles sont les verreries, les cristalleries et les fabriques de porcelaine.

57. *Produits de la combustion.* — Les produits de la combustion complète du bois consistent uniquement en vapeur d'eau et en acide carbonique. Mais, quand la combustion n'est pas complète, il se dégage de la fumée qui est principalement formée d'eau, d'acide acétique, d'huile essentielle empyreumatique, et d'une matière analogue au goudron. C'est à l'acide acétique qu'est due l'excitation de la fumée sur les yeux.

58. L'acide carbonique est un gaz incolore, inodore, beaucoup plus lourd que l'air, incombustible et impropre à alimenter la combustion. Pendant la combustion, il s'élève dans l'atmosphère à cause de la haute température qu'il possède.

59. *Puissance calorifique des bois.* — Tous les bois, ayant sensiblement la même composition chimique, doivent produire, au même degré de dessiccation, la même quantité de chaleur par leur combustion complète. C'est un fait qui résulte d'ailleurs des expériences directes faites par M. Berthier.

60. Rumford et après lui Hassenfratz se sont occupés de la détermination des quantités de chaleur produites par la combustion des différentes espèces de bois. Rumford s'est servi de l'appareil qui porte son nom et dont nous avons déjà parlé (22) ; Hassenfratz, du

calorimètre à glace; les expériences ont été faites sur des poids égaux de bois à divers états de dessiccation.

61. Rumford, en employant des bois de différente nature préalablement desséchés sur un poêle, a obtenu, pour leurs puissances calorifiques, des nombres qui ont varié de 3960 à 3450, et il a trouvé 2550 pour le bois à brûler ordinaire. On ne peut rien déduire de positif des expériences d'Hassenfratz, parce qu'il n'a pas indiqué l'état hygrométrique des bois sur lesquels il a fait ses observations, les résultats qu'il a obtenus sont que 1 kilogramme de bois peut fondre de 32 à 49 kilogrammes de glace; et comme 1 kilogramme de glace en fondant absorbe 79 calories, les limites extrêmes des puissances calorifiques observées sont $32 \times 79 = 2528$, et $49 \times 79 = 3871$, nombres qui se rapprochent beaucoup de ceux qui ont été obtenus par Rumford.

62. Ces expériences donnent des résultats bien inférieurs à celui qui résulte de la composition des bois, mais elles ont été faites sur une très-petite échelle, et il n'est pas douteux que les bois brûlés dans une petite enceinte, à une très-basse température, ne laissent dégager beaucoup de gaz combustibles; d'ailleurs les puissances calorifiques, observées par Rumford sur des bois desséchés, ont varié à peu près de 15 pour 100, et par conséquent on ne peut considérer la moyenne des expériences que comme une approximation assez vague.

Les expériences faites sur une grande échelle, l'une aux anciens bains du pont Marie, l'autre à Wesserling, ont donné des résultats qui doivent être beaucoup plus rapprochés de la vérité. Ces expériences n'ont pas eu pour objet la détermination de la puissance calorifique du bois, mais elles y conduisent.

63. Dans l'établissement de bains du pont Marie, l'appareil de chauffage était disposé de telle manière, que la fumée s'échappait à une température peu différente de celle de l'air. Dans un essai fait avec beaucoup de soin, on a brûlé, à très-peu près, 200 kilogrammes de bois pelard en deux heures : l'effet produit a été équivalent à l'échauffement de 7180 kilogrammes d'eau à 85°. Ainsi, on a recueilli $7180 \times 85 = 610300$ unités de chaleur, ce qui donne, pour chaque kilogramme, environ 3000. L'état hygrométrique du bois n'a point été observé; mais en admettant qu'il contenait 0,25 d'eau, on trouverait pour la puissance calorifique du bois sec 4000°.

64. A Wesserling, dans une chaudière à vapeur chauffée au bois, on a obtenu, pour la moyenne de plusieurs jours d'expérience, $3^k,24$

de vapeur par kilogramme de bois; la fumée, à son entrée dans la cheminée, était à 250°, et elle conservait encore 10 pour 100 d'oxygène ; par conséquent, la moitié seulement de l'oxygène de l'air avait été employée à la combustion. D'après cela, la puissance calorifique du bois se compose : 1° de la quantité de chaleur renfermée dans la valeur produite, qui est égale à $3,24 \times 650 = 2106$; 2° de la quantité de chaleur entraînée par la fumée ; or, le poids de l'air nécessaire pour brûler 1 kilogramme de bois est de 8k,50, en supposant que la moitié de l'air ait échappé à la combustion ; d'ailleurs la capacité calorifique de l'air est à peu près le quart de celle de l'eau ; la quantité de chaleur entraînée par la fumée a donc été de $8,50 \times 250 \times 1/4 = 532$; 3° de la quantité de chaleur absorbée par la vaporisation de l'eau renfermée dans le bois, qui est égale à $650 : 4 = 162$. Ainsi la puissance calorifique du bois, déduite de cette expérience, serait de $2106 + 532 + 162 = 2800$.

En admettant, comme précédemment, que le bois renfermait 0,25 d'eau, la puissance calorifique du bois sec serait de 3733. En admettant 0,30 d'eau, elle serait de 4000c.

Aucune de ces expériences n'est cependant assez précise pour qu'on puisse accepter le nombre qu'on en déduit comme représentant la véritable valeur de la puissance calorifique du bois.

65. MM. Scheurer-Kestner et Meunier dans des expériences récentes dont nous aurons surtout à parler lors de l'étude des combustibles fossiles, ont soumis la cellulose à la combustion dans le calorimètre de Favre et Silbermann; ils ont trouvé que cette substance donne très-sensiblement la quantité de chaleur qui répond à la quantité de carbone qu'elle contient; en effet, ils ont trouvé pour puissance calorifique de la cellulose le nombre 3622 : or, elle contient 44,44 de carbone pour cent, le reste de sa composition étant formé d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions qui constituent l'eau, et si l'on multiplie 0,4444 par 8080, puissance calorifique du carbone, on obtient comme produit le nombre 3591 bien voisin du précédent.

Le bois est par sa composition bien voisin de la cellulose dont il est formé pour la plus grande partie, on peut donc admettre que la règle de Dulong est applicable à la détermination de sa puissance calorifique. Nous avons trouvé que le bois desséché à 140° renferme 0,50 de carbone et 0,01 d'hydrogène libre. Sa puissance calorifique sera $0,50 \times 8080 + 0,01 \times 34462 = 4384$.

Mais il ne faut pas oublier que le nombre suppose que l'eau résultant de la combustion a été complétement condensée, ce qui n'a pas

lieu d'ordinaire quand le combustible brûle dans l'air ; or la quantité d'eau produite est 0,09 pour l'hydrogène libre et 0,47 pour l'eau de constitution ; en supposant que le bois contienne 0,02 de cendres, il y aura donc à retrancher de 4384 le produit $(0,47 + 0,09) \times 606,5 = 340$. La puissance calorifique se trouvera donc réduite à 4044, soit en nombre rond à 4000 calories.

66. La puissance calorifique des bois dépendant de leur état hygrométrique, et cet état pouvant varier dans des limites fort étendues, même dans des circonstances en apparence fort différentes, on ne peut réellement connaître la puissance calorifique du bois qu'on emploie, qu'après avoir constaté par expérience la quantité d'eau qu'il renferme. Si la dessiccation devait se faire à 100°, il suffirait de prendre un certain poids de bois à l'état de sciure, de le dessécher dans une capsule chauffée au bain-marie, et de peser le bois lorsqu'il ne se dégagerait plus sensiblement de vapeur. Mais par cette méthode, le bois conserve une certaine quantité d'eau, retenue par l'affinité de la fibre ligneuse. En effet, le bois n'est pas altéré à 150°, et d'après les expériences de M. Violette (52), de 125° à 150°, il y a une perte de 0,0267, et très-probablement elle était plus grande de 100° à 125°. Ainsi, pour dessécher complétement le bois, il faudrait le chauffer à 150°, opération qui présente quelques difficultés. On peut obtenir cette température avec des dissolutions salines, et particulièrement avec une dissolution convenable de chlorure de calcium employée dans l'étuve de Gay-Lussac.

On peut aussi pour les petits essais dont il est question, employer une lampe ordinaire. L'air brûlé qui sort de la cheminée est à peu près à 300°, et la veine d'air qui conserve cette température a une section qui va constamment en diminuant ; par conséquent, si on plaçait dans le courant d'air chaud un cylindre vertical ouvert par les deux bouts, la température moyenne de l'air qui le traverserait serait d'autant moins élevée que le cylindre serait placé à une plus grande hauteur. Mais, pour appliquer cette disposition à l'objet qui nous occupe, il faudrait que les veines d'air chaud qui traversent le cylindre fussent mêlées de manière à prendre une température commune. L'appareil représenté figure 2 satisfait aux conditions dont je viens de parler ; le cylindre est en tôle, de $0^m,10$ de hauteur et de diamètre ; il est garni intérieurement de plusieurs diaphragmes qui forcent le courant à passer successivement à la circonférence et au centre ; à la partie inférieure il est terminé par deux troncs de cône placés en sens contraires, et au sommet par une surface con-

cave et par la capsule de tôle dans laquelle on place la poudre à sécher. Cette capsule porte une tubulure à travers laquelle passe la tige d'un thermomètre ; l'appareil est soutenu par deux tiges qui permettent de le disposer à la hauteur convenable.

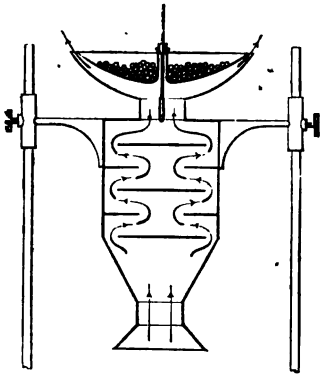


Fig. 2.

67. En résumant tout ce qui précède, nous admettrons,

1° Que tous les bois au même état de dessiccation produisent sensiblement la même quantité de chaleur;

2° Que pour les bois parfaitement desséchés artificiellement, la puissance calorifique est d'environ 4000, déduction faite de la chaleur latente de l'eau qui reste dans les produits de la combustion ; si on tenait compte de cette chaleur par une autre voie, on pourrait prendre un nombre plus élevé, soit 4300 environ ;

3° Que pour les bois dans l'état ordinaire de dessiccation, qui renferment à peu près 25 à 30 pour 100 d'eau, la puissance calorifique varie de 2800 à 2600.

Ces différents nombres seraient peut-être un peu forts pour certains bois dans lesquels la proportion d'hydrogène libre est un peu plus faible que celle que nous avons admise; d'un autre côté, d'après les expériences de MM. Scheurer-Kestner et Meunier la puissance calorifique calculée de la cellulose est un peu plus faible que la puissance calorifique observée, de sorte qu'on pourra sans erreur sensible adopter ces nombres pour tous les cas.

68. Quant à la puissance calorifique des bois rapportée à leur volume, on ne peut donner aucun nombre un peu précis, attendu que le poids d'un même volume de bois varie, non-seulement avec la densité du bois, mais beaucoup plus encore avec la grosseur des bûches, leurs courbures et la manière dont elles ont été placées pour former les piles.

69. La mesure désignée en France sous le nom de voie est de 2 mètres cubes ou stères. La longueur des bûches étant de $1^m,14$; la mesure du stère a $0^m,88$ de hauteur sur 1 mètre de longueur. A Paris, le poids de la voie des bois de chauffage varie de 700 à 750 kilogrammes. Celui des bois de charbonnage varie de 600 à 700 kilogrammes.

Lorsque les bûches sont rondes, de même longueur, de même dia-

mètre, régulièrement espacées et que le volume est considérable, le volume réel du bois est sensiblement constant et égal à 0,78 du volume apparent. En effet, considérons un parallélipipède rectangle dont la longueur l est égale à celle des bûches, et dont la section perpendiculaire à la longueur est égale à l'unité de surface ; en désignant par n le nombre des bûches placées dans l'unité de longueur, le diamètre de chacune sera $1 : n$, son rayon $1 : 2n$, la section $\pi : 4n^2$; et comme le nombre des bûches est égal à n^2, il s'ensuit que le volume réel du bois est égal à $l . \pi : 4 = l . 0{,}78$, le volume apparent étant l. Mais, pour qu'il en soit ainsi, il faut, comme je l'ai dit, que les bûches soient bien rondes, et que la section de la pile soit très-grande relativement à celle des bûches. Le nombre 0,78 doit être considéré comme une limite extrême qui n'est jamais atteinte.

70. *Combustion des différentes espèces de bois.* — Quoique les bois à un état de dessiccation parfaite soient tous susceptibles de donner sous le même poids des quantités de chaleur peu différentes, leur structure produit, dans leur mode de combustion, des variations qui ne les rendent pas tous également propres à tous les genres de travaux.

Les bois compactes ne brûlent qu'à leur surface ; la chaleur qui se propage dans l'intérieur en dégage les gaz combustibles qui brûlent en totalité dans les commencements, et il ne reste bientôt qu'un charbon volumineux, compacte, se consumant lentement et sans flamme. Les bois légers brûlent avec beaucoup plus de rapidité, parce que leur porosité permet à l'air d'y pénétrer plus facilement, et qu'ils se déchirent par l'action de la chaleur ; la majeure partie du carbone qu'ils renferment brûlant en même temps que les gaz combustibles, ils ne laissent que peu de charbon ; aussi ces bois donnent de la flamme presque pendant toute leur combustion. La différence entre ces deux espèces de bois diminue à mesure qu'ils sont en bûches d'une plus petite dimension ; la raison en est évidente.

On concevra facilement, d'après ce qui précède, pourquoi, dans les verreries, les fourneaux à porcelaine, et même les fours à poterie commune, où l'on a besoin d'une température très-élevée et d'une flamme longue et continue, on emploie toujours des bois tendres, tandis que pour presque tous les autres usages, où l'on a besoin d'une température beaucoup moins élevée et dans un lieu plus voisin du foyer, les bois durs sont préférés.

Quel que soit d'ailleurs le bois que l'on emploie, l'effet calorifique sera d'autant plus grand que le bois sera plus divisé, parce qu'alors

une plus petite quantité d'air échappera à l'action du combustible, et comme il faut toujours que l'air finisse par s'échapper à une température supérieure à celle de l'atmosphère, on conçoit facilement que plus la quantité d'air employée à la combustion de la même quantité de matière sera petite, moins il y aura de perte de chaleur par l'air qui s'écoule. Mais, indépendamment des frais qu'occasionnerait la refente du bois, souvent la nature de l'opération ne permet pas d'employer du bois trop menu, parce que la combustion serait trop rapide. Il n'y a qu'un petit nombre d'usines, telles que certaines verreries et les fabriques de porcelaine, où la prompte combustion étant un avantage, puisqu'elle produit toujours une température plus élevée, il soit important d'employer le bois refendu.

CHAPITRE IV.

Charbon de bois.

71. Le charbon de bois est une matière qu'on obtient en soumettant le bois, dans certaines conditions, à une température plus ou moins élevée, mais qui dépasse toujours 340°. Jusqu'à 150° le bois n'éprouve qu'une simple dessiccation et abandonne seulement l'eau hygrométrique qu'il contient ; mais à une plus haute température, il se décompose et donne un résidu solide, plus riche en carbone que le bois, et la proportion de carbone est d'autant plus considérable que la température a été plus élevée. Les phénomènes qui se produisent dans la calcination du bois sont très-compliqués, ils ont été étudiés avec beaucoup de soin par M. Violette. Je rapporterai les faits les plus importants consignés dans les mémoires de cet habile chimiste, insérés dans les volumes XXIII et XXXII des *Annales de chimie et de physique*.

72. Les premières expériences ont été faites sur du bois de bourdaine réduit en petites baguettes de $0^m,06$ de longueur et de $0^m,01$ de diamètre, et réunies au nombre de vingt, pesant de 130 à 140 grammes. Ces bottes ont été séchées séparément à la température de 150°, en les faisant traverser par un courant de vapeur surchauffée. Le passage de la vapeur pendant deux heures suffisait à la dessiccation complète ; car, par une opération d'une plus grande durée, le poids du bois ne changeait pas. La carbonisation a été effectuée aussi par la vapeur surchauffée, du moins jusqu'à 350°, et la température était

mesurée par un thermomètre à mercure. La carbonisation à des températures supérieures a été effectuée dans des creusets placés dans un bon fourneau à calcination alimenté par du coke et du charbon de bois. Pour connaître à peu près la température produite, on avait placé, dans différentes baguettes de bois, de petits fragments de la grosseur d'une tête d'épingle d'un des six métaux suivants : antimoine, cuivre, argent, or, acier, fer, platine. Le métal était logé dans une petite cavité pratiquée à l'extrémité de la baguette et recouvert d'une couche de poussière de charbon bien tassé. En élevant progressivement la température du fourneau, on a pu arriver par tâtonnement à fondre le premier métal seulement, ou les deux premiers, ou les trois premiers, et enfin tous ; il est évident que la température obtenue était comprise entre celle de la fusion du dernier métal fondu et celle du métal suivant. M. Violette admet par approximation que la température de la carbonisation est celle de la fusion du dernier métal fondu. Les températures de fusion sont celles qui ont été trouvées par M. Pouillet. L'expérience ayant démontré que l'exposition du bois pendant trois heures à une certaine température suffisait au dégagement de toutes les matières qui peuvent s'échapper à cette température, toutes les carbonisations ont été effectuées dans ce laps de temps.

73. Voici d'abord les résultats obtenus sous le rapport du rendement :

Températures auxquelles le bois desséché à 150° a été soumis.	Quantités de produits obtenus p. 100 parties de bois sec.	OBSERVATIONS.
150°	100,00	
160	98,00	
170	94,55	
180	88,59	Ces produits ne sont que du bois de plus en plus altéré, mais ne peuvent pas être désignés sous le nom de charbons. Ils portent celui de brûlots.
190	81,99	
200	77,10	
210	73,14	
220	67,50	
230	55,37	
240	50,79	
250	49,67	
260	40,23	
270	37,14	
280	36,16	Charbon très-roux commençant à être friable.
290	34,09	
300	33,61	
310	32,87	

	Températures auxquelles le bois desséché à 150° a été soumis.	Quantités de produits obtenus p. 100 parties de bois sec.	OBSERVATIONS.
	320	33,23	
	330	31,77	
	340	31,53	Charbon très-noir ainsi que les suivants.
	350	29,26	
Fusion de l'antimoine	432	18,87	
— de l'argent...	1023	18,75	Charbons noirs et très-durs.
— du cuivre....	1100	18,40	
— de l'or.....	1250	17,94	
— de l'acier....	1300	17,16	
— du fer.....	1500	17,31	
— du platine....	»	15,00	

Ainsi, le charbon roux se produit entre 280° et 340° ; au delà, le charbon est noir, et le rendement va constamment en diminuant avec l'accroissement de la température.

74. Mais, indépendamment de la température, une autre circonstance a une grande influence sur le rendement, c'est l'activité plus ou moins grande de la carbonisation, résultant du plus ou moins de facilité que les gaz produits trouvent à se dégager. M. Violette a obtenu par une carbonisation lente un produit deux fois plus grand que par une carbonisation rapide à la même température.

75. Voici maintenant la composition des charbons obtenus dans les expériences que nous avons rapportées, mais à des températures plus espacées.

COMPOSITION MOYENNE DES CHARBONS DE BOIS DE BOURDAINE

PRÉPARÉS A DES TEMPÉRATURES CROISSANTES.

TEMPÉRATURE de la CARBONISATION.	SUBSTANCES ÉLÉMENTAIRES TROUVÉES DANS 100 PARTIES DE CHARBON			
	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE, AZOTE ET PERTE.	CENDRES.
150°	47,5105	6,1200	46,2900	0,0800
200	51,8170	3,9945	43,9760	0,2265
250	65,5875	4,8100	28,9670	0,6320
300	73,2360	4,2540	21,9620	0,5690
350	76,6440	4,1360	18,4415	0,6130
432	81,6435	2,9610	15,2455	1,1625
1023	81,9745	2,2975	14,1485	1,5975
1100	83,2925	1,7020	13,7935	1,2215
1250	88,1385	1,4150	9,2595	1,1990
1300	90,8110	1,5855	6,4895	1,1515
1350	94,5660	0,7395	3,8405	0,6640
Fusion du platine.	96,5170	0,6215	0,9360	1,9455

On voit, d'après ce tableau, que la quantité de carbone renfermée dans les charbons va en augmentant à mesure que la température de la carbonisation est plus élevée, mais qu'à la plus haute température que nous puissions produire, on ne peut jamais obtenir du carbone pur, même en ne tenant pas compte des cendres.

76. En calculant, d'après le rendement du bois en charbon et la composition du charbon aux diverses températures, on trouve les résultats suivants pour la quantité de carbone correspondant à 100 parties de bois :

A 150°.....	47,51	A 1023°.....	15,30
200.....	39,88	1100.....	15,32
250.....	32,98	1250.....	15,80
300.....	24,61	1300.....	15,85
350.....	22,42	1500.....	16,36
432.....	15,40	Fusion du platine.....	14,47

Il résulte de là que la perte en carbone reste à peu près constante à partir de 432°, et probablement à une température inférieure, mais supérieure pourtant à 350° ; alors, à partir de cette température, la diminution dans le rendement provient uniquement de la diminution des gaz renfermés dans le charbon. Les petites anomalies, qu'on trouve dans le rendement en carbone, proviennent certainement des erreurs inévitables dans des expériences aussi délicates.

77. Il résulte de l'analyse des deux charbons qui ont été obtenus, l'un par une carbonisation lente, l'autre par une carbonisation rapide, que ce dernier renferme moins de carbone que le premier : ainsi, par une carbonisation rapide, il y a beaucoup moins de rendement et le produit est moins riche en carbone.

78. M. Violette a examiné ce qui arrive quand le bois est soumis à l'action de la chaleur dans des vases exactement clos, et d'où par conséquent aucun gaz ne peut se dégager. Le bois était placé dans un tube de verre épais, dont il occupait presque toute la capacité, et qui était fermé à la lampe d'émailleur. Dans chaque expérience on opérait sur quatre tubes renfermés chacun dans un tube métallique, afin que la rupture de l'un d'eux n'occasionnât pas celle des autres. La carbonisation avait lieu par la vapeur surchauffée. Les tubes qui avaient résisté étaient transparents et laissaient voir le bois carbonisé et un centimètre cube d'un liquide tantôt transparent et légèrement ambré, plus souvent d'un blanc laiteux opaque. L'ouverture des tubes, dans lesquels les gaz avaient une tension énorme, a pré-

senté beaucoup de difficultés. Si l'on brisait la pointe effilée du tube, préalablement enveloppé d'un linge épais, il se produisait une violente détonation, et le tube ainsi que le charbon étaient réduits en poudre. Après beaucoup d'essais infructueux, M. Violette a trouvé un moyen qui a parfaitement réussi; il consiste à plonger dans la flamme d'une lampe à alcool l'extrémité effilée du tube, le verre se ramollit et finit par s'ouvrir en une fissure imperceptible, qui laisse échapper en sifflant un jet de gaz, ce qui diminue peu à peu la tension intérieure. M. Violette a pu ainsi recueillir le charbon produit, ainsi que le liquide ; le poids du gaz dégagé était évidemment représenté par le poids du bois diminué de celui du charbon et du liquide.

79. Il résulte des expériences faites de 10° en 10° depuis 160° jusqu'à 340°, toujours au moyen de la vapeur surchauffée, que le poids du charbon obtenu a varié d'une manière à peu près uniforme de 0,974 à 0,791 ; tandis que dans des vases ouverts, pour les mêmes températures, il varie de 0,97 à 0,29 ; ainsi le produit solide de la carbonisation en vases clos est beaucoup plus considérable qu'en vases ouverts.

80. Le charbon obtenu à 180° est très-roux, très-friable et semblable à celui qu'on produit en vases ouverts à 280° ; mais il en diffère sous le rapport de sa composition, qui s'écarte peu de celle du bois.

81. Le charbon, produit à 300° et au delà, a réellement éprouvé une véritable fusion, car il s'est affaissé et adhère fortement au verre; il est luisant, miroitant, caverneux, dur, cassant, entièrement semblable à de la houille grasse qui aurait été fondue.

Un fait également digne de remarque, c'est que les charbons, produits aux températures de 260° à 340°, contiennent de 3 à 4 pour 100 de cendres, tandis que les charbons produits en vases ouverts aux mêmes températures n'en contiennent que 1/2 pour 100. Ce singulier résultat ne peut s'expliquer qu'en admettant que les gaz, en se dégageant, entraînent avec eux une grande partie des substances minérales contenues dans le bois.

82. M. Violette a déterminé avec beaucoup de soin la quantité de charbon obtenu de différentes matières ligneuses, préalablement desséchées à 150°, et soumises ensuite en vases ouverts à une température de 300°, au moyen de la vapeur surchauffée. Le tableau suivant renferme les résultats des expériences pour un certain nombre de bois. Les nombres représentent les quantités de charbon relatives à 100 parties de matières sèches.

Liége	62,80	Pommier	34,69
Saule pourri	52,17	Orme	34,59
Paille de blé	46,99	Charme	34,44
Chêne	46,09	Aune	34,40
If	46,06	Bouleau	34,17
Bois de hêtre	44,25	Prunier	34,06
Pin maritime	41,48.	Érable	33,75
Peuplier (feuilles)	40,95	Saule	33,74
Peuplier (racines)	40,90	Bourdaine	33,61
Pin sauvage	40,75	Frêne	33,28
Mélèze	40,31	Poirier	31,88
Châtaignier	36,06	Tilleul	31,85
Cerisier	35,53	Peuplier (tronc)	31,12
Tremble	34,87	Marronnier	30,86

83. De tout ce que nous venons de dire résultent les faits suivants :

1° Le bois carbonisé à des températures différentes donne un rendement qui décroît à mesure que la température est plus élevée. Pour le bois de bourdaine, préalablement desséché à 150°, le rendement est de 0,50 à 250°, de 0,33 à 308°, de 0,20 à 400°, de 0,15 à la plus haute température que nous puissions produire.

2° Le bois produit une quantité de charbon d'autant plus considérable que l'opération s'effectue plus lentement, c'est-à-dire que les gaz éprouvent plus de difficulté à se dégager.

3° Le carbone contenu dans le bois se divise dans l'acte de la carbonisation en deux parties : l'une reste dans le produit solide de l'opération ; l'autre s'échappe avec les matières volatiles. Ce partage varie avec la température de la carbonisation pour le bois de bourdaine : à 250° la quantité de carbone qui reste dans le charbon est les deux tiers du poids total ; entre 300° et 350°, elle en est la moitié ; au delà de 1500°, elle n'en est plus que le tiers.

4° La quantité de carbone renfermée dans le charbon augmente avec la température de la carbonisation. Pour le bois de bourdaine, on en trouve 0,64 à 250°, 0,73 à 300°, 0,80 à 400°, 0,96 au delà de 15°00, à la plus forte température. Mais pour ce même bois, à partir d'une température comprise entre 350° et 412°, la quantité de carbone, renfermée dans le charbon, est constante et égale à peu près à 10,5 du poids du bois sec, de sorte que la diminution de rendement porte uniquement sur le poids des gaz renfermés dans le charbon. Il n'est pas douteux que cette circonstance ne doive exister pour les autres bois, mais peut-être à des températures différentes.

5° Le charbon renferme toujours des gaz ; la plus haute température que nous puissions produire ne l'en a jamais dépouillé complétement. Cette quantité de gaz, pour le charbon de bois de bourdaine, est de 0,50 à 250°, de 0,33 à 300°, de 0,25 à 350°, de 0,05 à 400°, de 0,01 à 1500°.

6° Le bois carbonisé dans des vases entièrement clos retient à l'état solide presque tout le carbone qu'il contenait. Pour le bois de bourdaine, de 160 à 340°, la quantité de carbone renfermée dans le charbon est à peu près le triple du rendement ordinaire.

7° Dans la carbonisation en vases ouverts, on n'obtient du charbon roux, avec le bois de bourdaine, qu'à 270° et on a seulement 0,40 de rendement, tandis qu'en vases clos le bois se change en charbon roux à 180° avec un rendement de 0,90.

8° Le bois, en vases clos, à une température de 300 à 400°, éprouve une véritable fusion ; il ne conserve aucune trace d'organisation et ressemble à de la houille grasse qui aurait été fondue.

9° Les charbons faits en vases clos donnent beaucoup plus de cendres que les charbons produits dans des vases ouverts : par conséquent, dans les méthodes ordinaires de fabrication, une partie des matières minérales est entraînée par les gaz qui se dégagent.

10° Enfin, les différents bois séchés à la même température de 150°, carbonisés à la même température de 300°, donnent des rendements très-différents. Il est probable qu'à une température plus élevée le rendement en carbone pur reste constant comme pour le bois de bourdaine.

Examinons maintenant les différents procédés de carbonisation employés dans l'industrie.

84. *Différentes méthodes de carbonisation du bois.* — La carbonisation en meule, dont la connaissance remonte à une époque très-reculée, est encore généralement suivie dans nos forêts.

On commence par choisir, à portée du bois que l'on exploite, un terrain ferme, uni, horizontal, pour y établir le fourneau. Si l'on ne trouvait dans le voisinage de l'exploitation qu'un terrain rocailleux, on le nivellerait par des transports de terre. Après avoir battu le sol à la dame et avoir tracé la circonférence du fourneau, on place verticalement une des plus grosses bûches, et on range horizontalement et dans la direction des rayons du cercle les bûches les plus grosses ; sur cette première couche de bois, qu'on nomme le *plancher*, on place d'autres lits disposés de la même manière, mais d'un diamètre de plus en plus petit, de manière à former un cône tronqué. Plus

souvent les bûches sont placées debout sur le premier plancher. Quand la pile a atteint la hauteur de la bûche centrale, on place une seconde bûche sur celle qui formait l'axe, afin d'en doubler la hauteur, et on continue de monter la pile jusqu'au sommet de la seconde bûche. Cette opération étant terminée, on revêt toute la surface extérieure de la meule d'une couche de *fraisil :* on désigne ainsi un mélange de terre et de poussier de charbon qui reste sur le sol du fourneau après l'opération. Faute de fraisil, on se sert de terre très-divisée, de gazon, pour former le premier enduit du fourneau; il doit avoir de $0^m,12$ à $0^m,18$ d'épaisseur. On a soin de laisser à découvert quelques trous correspondant aux rondins placés à la base, afin de donner accès à l'air extérieur dans la meule.

Le fourneau étant ainsi disposé, on peut le mettre en feu; pour cela, on enlève la bûche placée dans l'axe lors de l'élévation du dernier étage, et on jette dans le vide qu'elle laisse du bois sec très-menu et des charbons incandescents. La combustion se propage rapidement, et bientôt il sort de la fumée, non-seulement par la cheminée, mais encore par un grand nombre de points de la surface du fourneau. Aussitôt que la flamme commence à sortir par la cheminée, on ferme celle-ci en partie par une plaque de gazon. Puis, après quelque temps, on commence à percer l'enveloppe à partir du sommet; ces évents donnent issue aux produits de la combustion. La couleur et l'abondance des fumées permettent de juger de l'état de l'opération dans cette partie de la meule. Quand cette fumée est d'un bleu clair, presque transparente et peu abondante, l'ouvrier perce de nouveaux évents dans un plan horizontal à $0^m,20$ ou $0^m,30$ au-dessous des premiers, qui doivent alors être bouchés. On continue ainsi jusqu'au bas. Les évents d'admission de l'air, qui se trouvent à la partie inférieure de la meule, restent constamment ouverts.

Le charbonnier doit observer le feu avec attention, afin de régler l'entrée de l'air et l'issue de la fumée le plus régulièrement possible; il doit couvrir de terre les parties de la surface d'où la fumée se dégage en trop grande abondance, et il doit, de temps en temps, ajouter de la terre au bas du fourneau, pour rétrécir continuellement les ouvertures qui donnent accès à l'air extérieur. Les vents peuvent avoir une influence très-fâcheuse sur les fourneaux à charbon; aussi est-on souvent obligé de s'en préserver par des abris ordinairement formés d'un clayonnage en osier.

Après un certain temps, qui dépend de la grandeur de la meule,

toute la masse est incandescente, et l'ouvrier attend l'apparition du *grand feu;* c'est le moment où l'enveloppe devient rouge ; à cet instant, le charbon est fait. Alors on jette de la terre sur le fourneau pour le recouvrir en totalité et arrêter la combustion; quelques heures après, on renouvelle cette enveloppe et on attend que le charbon soit éteint pour le retirer.

On voit, d'après cela, que la réussite de l'opération dépend uniquement des soins et de la vigilance des ouvriers, et que les moindres négligences, ou des vents violents dont on ne pourrait pas s'abriter, occasionneraient non-seulement de grandes diminutions dans le produit en charbon, mais encore pourraient ne laisser que des cendres pour résultat de l'opération.

85. Par ce procédé, on obtient environ 20 de charbon pour 100 parties de bois en poids : dans les meules usitées en forges, on obtient 21, 22 et même 24 pour 100 suivant les bois et suivant leur âge.

On obtient en volume de 25 à 30 pour 100 dans les petites meules et de 30 à 34 dans les grandes qui sont les meules ordinaires.

86. D'après les renseignements recueillis par M. Sauvage, ingénieur des mines, dans les départements des Ardennes et de la Meuse, les essences de bois employées pour la carbonisation sont : 0,25 de hêtre et de chêne, 0,25 de tremble et de saule, 0,50 de charme. Les bûches ont de $0^m,85$ à $0^m,90$ de longueur; elles sont placées presque verticalement dans le fourneau qui en renferme trois couches; les meules contiennent ordinairement de 60 à 90 stères; la carbonisation dure de sept à douze jours. Les rendements sont ainsi qu'il suit :

ARDENNES.

	Bois mêlés.
Poids du stère de bois	300^k
Un stère rend en volume	$0^m,30$ à $0^m,33$
Un stère rend en poids	60 à 66^k
100^k de bois rendent	20 à 22^k
Le poids du mètre cube de charbon est	200^k

MEUSE.

	Bois durs.
Poids du stère de bois	375^k
Un stère rend en volume	$0^m,33$ à $0^m,40$
Un stère rend en poids	80^k
100^k de bois rendent	21^k
Le poids du mètre cube de charbon est	240^k

87. M. Ebelmen, en comparant la composition des gaz qui s'échappent des évents pratiqués à la surface des meules avec celle des gaz produits par la carbonisation en vases clos, a constaté : 1° que l'oxygène de l'air introduit dans la meule par les évents se transforme complétement en acide carbonique sans mélange d'oxyde de carbone; 2° que cette transformation a lieu sur le charbon déjà formé et non sur les produits de la distillation du bois; 3° que la carbonisation s'opère dans les meules de haut en bas et du centre à la circonférence. La surface de séparation, entre le charbon formé et le bois incomplétement carbonisé, est celle d'un cône renversé, ayant le même axe que la meule, mais dont l'angle au sommet va constamment en augmentant à mesure que la carbonisation s'approche de la base. L'air passe à travers le bois non carbonisé, à cause de la difficulté qu'il éprouve à traverser le charbon qui a éprouvé un grand tassement; aussi les évents nouveaux donnent exclusivement écoulement au gaz; ceux qui sont au-dessus se ferment d'eux-mêmes.

88. Le procédé que nous venons de décrire a été modifié aux forges d'Audincourt; nous extrayons le passage suivant du mémoire d'Ebelmen relatif à cet objet (*Annales des Mines*, tome III, 4^{me} série).

« Les modifications pratiquées à Audincourt diffèrent peu de celles indiquées par différents auteurs, et notamment par M. Karsten (*Traité de la métallurgie du fer*). Elles consistent à supprimer le vide de la cheminée et à déterminer l'inflammation du cœur de la meule au moyen d'une plaque de tôle chauffée par-dessous. On pratique au centre de l'aire un vide conique qui a 1^{m},33 de diamètre à la base supérieure, 0^{m},50 à la base inférieure, et 0^{m},50 de hauteur. Les parois en sont formées par des briques. Trois conduits en briques de 0^{m},12 de côté partent du fond de cette chaudière et viennent déboucher à l'air libre, en dehors de l'espace réservé pour la meule. La chaudière est remplie de menu bois, de fumerons et recouverte d'une plaque de tôle. On dresse la meule sur une base de 9 mètres de diamètre, avec du bois scié de 0^{m},67 de longueur sur trois étages. Dans la partie qui correspond à la projection de la chaudière, on met sur le premier étage du bois une couche épaisse de terre et de fraisil, puis on dispose la meule comme à l'ordinaire, en ayant soin que les vides laissés entre les bûches soient les plus petits possible, et que chaque bûche se trouve dans le plan diamétral passant par l'axe de la meule. On met le feu au combustible contenu dans la chaudière, on découvre la partie supérieure de la meule et on ouvre les trous

du pied. Le fraisil placé sur le premier étage sert à élargir l'espace dans lequel la combustion commence pour se répandre ensuite dans toute la masse du bois. Quand la meule est bien en feu, on ferme les trois ouvreaux communiquant avec la chaudière, on couvre la meule et on conduit l'opération comme à l'ordinaire en perçant des évents à partir du haut. L'opération dure quatre ou cinq jours et s'exécute sur 28 à 35 stères de bois. On a reconnu qu'il y avait de l'avantage à opérer sur ce volume de bois au lieu de 150 ou 180 stères qui composaient les anciennes meules d'Audincourt, et dont la carbonisation durait de douze à quinze jours. Le bois était scié en bûches de $1^m,33$ de longueur. » Voici les résultats obtenus :

	Meule de :	Longueur des bûches.	Volume obtenu pour 100 parties de bois.
Ancienne méthode...	150 à 180 stères.	$1^m,33$	36,52
Même méthode.....	28 à 35 —	$1^m,67$	39,55
Méth. avec chaudière.	28 à 35 —	$0^m,67$	43,73

Ainsi, il y avait un grand avantage à employer les chaudières. On a reconnu qu'il n'y avait pas d'inconvénient à porter le volume du bois à 50 ou 60 mètres cubes ; mais les petites meules sont plus faciles à conduire et à surveiller. Malheureusement les meules à fourneaux ne peuvent être employées que quand les lieux de la carbonisation ne changent pas ; car dans les forêts la construction des fourneaux serait un accroissement notable de dépense.

On a imaginé, pour mettre la meule en feu, une nouvelle disposition plus simple que la chaudière dont nous venons de parler, et tout aussi avantageuse. Dans l'axe de la meule se trouvent deux cheminées en tôle concentriques ; l'intervalle qui les sépare est rempli de charbon menu jusqu'à la hauteur du premier étage, $0^m,70$; on allume par la cheminée centrale et on conduit l'opération comme à l'ordinaire. Pour une meule de 50 à 60 stères on emploie 10 à 12 hectolitres de braise.

On peut recueillir une grande partie de l'acide pyroligneux en plaçant dans les évents des tuyaux de fer-blanc environnés d'eau froide Une meule de 60 stères fournit à peu près 1800 litres d'acide (Ebelmen).

Les dispositions que nous venons d'exposer et au moyen desquelles on recueillait l'acide pyroligneux, ont été depuis longtemps abandonnées à Audincourt.

89. Marcus-Bull, en remplissant les intervalles des bûches avec du

poussier de charbon, a obtenu une augmentation notable dans le rendement. L'accroissement du produit obtenu par ce moyen est facile à comprendre : le poussier de charbon, en brûlant, préserve les bois de la combustion.

90. Le mode de carbonisation en meules a l'inconvénient d'être d'une conduite difficile et d'être soumis aux influences atmosphériques ; on a proposé différents procédés pour éviter ces inconvénients; mais comme ils sont fondés sur l'emploi de vases plus ou moins clos, comme d'autre part la carbonisation doit toujours se faire en forêt pour éviter les prix de transport, l'apport, l'installation et l'entretien des appareils en forêt sont choses difficiles et ces procédés ne sont pas entrés dans la pratique. On continue donc à employer exclusivement l'ancienne méthode avec quelques perfectionnements de détail dans l'installation des meules.

91. Dans les fabriques d'acide pyroligneux, le bois est distillé dans des chaudières en tôle, qu'on enlève des fourneaux et qu'on replace au moyen d'une grue. Ces chaudières communiquent avec l'appareil de condensation au moyen d'un tuyau, et les gaz, après leur refroidissement et la condensation des vapeurs, sont dirigés dans le foyer où ils sont brûlés. La consommation de bois dans le foyer est de 12,5 pour distiller 100 parties de bois. Le charbon obtenu est de bonne qualité ; son poids s'élève de 28 à 30 pour 100 parties de bois.

92. Dans ce mode d'opération, comme nous venons de le dire, on brûle sur la grille les gaz combustibles qui se dégagent, mais après qu'ils ont été séparés de l'acide pyroligneux et du goudron qu'ils renfermaient. Il n'est pas douteux que si ces gaz et le goudron arrivaient chauds sur la grille, ils suffiraient seuls à la distillation.

93. *Charbons roux.* — Il y a quelques années, on croyait qu'il y avait un grand avantage à employer dans les hauts fourneaux du bois incomplétement carbonisé à l'état de charbon roux; on prétendait obtenir ainsi une économie de près de 0,5. Pour opérer cette carbonisation partielle, on a d'abord employé la chaleur perdue du haut fourneau. Le bois était placé dans des caisses en fonte, ayant un mètre cube de capacité, dont les fonds et les faces latérales étaient chauffés par la flamme du gueulard (*Annales des Mines*, tome XI, 3^{me} série). Mais comme ce mode de travail n'était praticable qu'autant que les bois étaient très-rapprochés des usines, on s'est occupé de la fabrication des charbons roux en forêt. On a d'abord essayé si, par la méthode ordinaire, en arrêtant la carbonisation à une époque convenable, on ne parviendrait pas au résultat cherché ; mais on n'a

rien obtenu de satisfaisant : une partie du bois était transformée en charbon noir, et une autre à peine altérée. On a espéré s'approcher davantage du but, par une disposition particulière du fourneau et du mode de chauffage. Le fourneau a la forme d'un prisme allongé; le bois y est placé horizontalement, et il est recouvert suivant la méthode ordinaire. Au-dessous du fourneau et dans l'axe se trouve un canal creusé dans le sol, de $0^m,2$ de côté, fermé en dessus par des plaques de fonte disposées de manière à laisser de petits intervalles entre elles; au-dessus de ce canal, le bois est placé de manière à former une voûte demi-cylindrique, de $0^m,5$ à $0^m,6$ de rayon. Le canal creusé dans le sol communique avec un foyer à grille construit à l'un des bouts du fourneau, et dans lequel l'air est injecté par un ventilateur à force centrifuge. Le foyer est entretenu avec du menu bois. La quantité de bois qu'on brûle dans le foyer est égale à 0,1 de celle du bois torréfié. On pouvait espérer par cette méthode arriver à une calcination uniforme dans toute la masse, car on est maître de faire passer le courant d'air chaud par une partie quelconque du fourneau, puisque cette direction est déterminée par la position des orifices de l'enveloppe (*Annales des Mines*, tome XV, 3^{me} série). Cependant la pratique n'a pas fourni des résultats répondant à ces prévisions. Ces divers modes ont tous le défaut de donner des produits très-irréguliers ; c'est là surtout ce qui les a fait abandonner dans les hauts fourneaux et les forges, où on les avait essayés.

94. La méthode de fabrication régulière du charbon roux consiste à chauffer le bois renfermé dans un vase clos, en y introduisant de la vapeur surchauffée; la température se répartit avec une grande uniformité; on arrête facilement l'opération à l'instant propice, et on obtient un produit très-homogène. Ce mode de carbonisation imaginé par MM. Thomas et Laurens n'était pas destiné aux usages métallurgiques, qui exigent des installations simples et peu coûteuses; mais il a été appliqué avec succès en France et en Belgique pour la production du charbon roux destiné à la fabrication de la poudre et principalement à celle de la poudre de chasse.

Le procédé de ces ingénieurs a fonctionné pendant dix ans à la poudrerie d'Esquerdes (Nord) et à celle de Saint-Chamas (Bouches-du-Rhône); l'usage en a cessé en France par des motifs étrangers à la qualité des produits et à l'économie du procédé. D'après les communications faites, lors de l'exposition de 1867, par M. Van Cromphant, directeur de la poudrerie royale de Wetteren (Belgique), « la carbonisation du bois par la vapeur surchauffée donne les char-

bons de la meilleure qualité, réservés pour les poudres de choix ; ce procédé a été installé a Wetteren en 1842, le succès obtenu fit installer un second appareil en 1844. »

Pour opérer la carbonisation, on place le bois dans des vases de tôle, où il est soumis à l'action d'un courant de vapeur surchauffée qui entre par le haut du récipient et s'échappe par le bas. La vapeur saturée, obtenue au moyen d'un générateur ordinaire, se surchauffe en circulant dans des tuyaux en fonte, chauffés par la flamme d'un foyer à la houille ou au bois ; la fumée du même foyer passe ensuite autour des vases, afin d'éviter leur refroidissement. On connaît l'état d'avancement de l'opération au moyen d'un thermomètre plongeant dans ces vases, et mieux par la couleur des vapeurs qui s'en échappent. M. Violette, lorsqu'il était commissaire des poudres à Esquerdes, a fait d'intéressantes observations sur lè fonctionnement de cet appareil et sur les produits qu'il fournit, produits supérieurs en quantité et en qualité à ceux obtenus par les autres méthodes usitées dans les poudreries (*Annales de Chimie et de Physique*, tome XXIII).

95. *Propriétés du charbon de bois.* — Le charbon de bois est solide, cassant, friable; il conserve la structure du bois qui l'a produit. Quoique facile à pulvériser, il donne une poussière très-dure.

96. La densité du charbon de bois peut être considérée, comme celle du bois, sous son volume apparent, ou sous le volume qu'occupe la matière solide. La densité des morceaux de charbon sous leur volume apparent pourrait se déterminer en les taillant en prismes dont on déterminerait le poids et le volume. Ces expériences n'ont point été faites ; elles seraient d'ailleurs sans intérêt : ce qui importe, c'est la connaissance du poids du mètre cube de différents charbons.

Poids du mètre cube de charbon en kilogrammes.

Charbon de chêne et de hêtre.....	240 à 250[k]
— de bouleau.....	220 à 230
— de pin.....	200 à 210

97. M. Violette a déterminé, par la méthode qu'il avait employée pour le bois, la densité de la matière solide qui forme les charbons de bois. Il a opéré sur le charbon de bois de bourdaine produit à différentes températures. Les charbons avaient été séchés à 100°, et réduits en poudre impalpable ; leur séjour dans le vide a été prolongé pendant dix jours; on opérait sur un gramme de charbon. M. Vio-

lette a déduit de ses expériences les résultats suivants : 1° à 150°, le bois n'a point éprouvé d'altération, parce que sa densité est la même que celle du bois desséché à 100° ; 2° la densité des charbons produits de 150° à 260° décroît de 1,507 à 1,402 ; 3° la densité des charbons produits à des températures supérieures à 270° croît avec la température, de manière à devenir égale à 2, à 1500°. La densité du noir de fumée calciné est de 2,300 ; la densité du diamant varie de 3,50 à 3,53.

98. Le charbon de bois est infusible. Il jouit de la propriété d'absorber un grand nombre de gaz.

99. Les charbons ordinaires, qui n'ont été soumis qu'à la température seulement suffisante pour leur production, sont à la fois mauvais conducteurs de la chaleur et de l'électricité, et très-combustibles ; tandis que ceux qui ont été portés au rouge sont bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité, d'une combustion difficile, et cela, d'autant plus qu'ils ont été plus fortement chauffés. Lorsque les premiers sont séparés d'un foyer et exposés à l'air, ils continuent à brûler, tandis que les autres s'éteignent. Ces dernières propriétés sont les conséquences naturelles de la différence de conductibilité.

100. Les charbons de différents bois, soumis à la même température, sont d'autant plus conducteurs de la chaleur et de l'électricité et d'autant moins combustibles qu'ils proviennent de bois plus denses.

M. Violette a essayé de déterminer les rapports de conductibilité des charbons pour la chaleur ; mais la méthode qu'il a employée est trop inexacte, comme il le reconnaît lui-même, pour qu'on puisse en tirer d'autre conclusion que l'ordre de conductibilité des charbons. D'après ses expériences, les charbons conduisent d'autant mieux la chaleur qu'ils ont été produits à une température plus élevée. Il résulte aussi de ces expériences que la plupart des charbons de bois différents, produits à la même température, ont sensiblement la même faculté conductrice.

101. Les charbons exposés à l'air humide absorbent une certaine quantité d'eau. M. Violette a obtenu les résultats suivants. Des charbons produits aux températures de

150°	200°	250°	300°	350°	1023°	1250°	1500°
ont absorbé pour 100 parties							
20,86	10,02	7,40	7,61	5,89	4,67	4,76	2,204

102. Les expériences ont duré plus de trois mois, et n'ont cessé que lorsque les charbons n'augmentaient plus de poids. Il résulte de ces expériences que le charbon est d'autant moins hygrométrique qu'il a été produit à une plus haute température. Les charbons noirs ordinaires, obtenus à une température comprise entre 250 et 400°, peuvent absorber de 5 à 7 pour 100 d'eau. Le charbon en poudre absorbe plus d'eau que le charbon en morceaux ; la différence varie de 0,3 à 0,5.

103. Comme on prend rarement les précautions nécessaires pour soustraire le charbon à la pluie, il est rare d'en trouver qui ne contienne pas de 10 à 12 pour 100 d'eau. Il en résulte un inconvénient assez grave ; pendant la combustion, une partie de la chaleur est employée inutilement à vaporiser cette eau.

104. Les charbons de bois conservés longtemps deviennent friables ; dans le transport, ils se tassent et leur volume en halle diminue. Ils produisent alors beaucoup de poussier. Les charbons légers ont cet inconvénient à un plus haut degré que ceux qui proviennent de bois compactes. On attribue cet effet à la cristallisation des sels que renferme le charbon, cristallisation qui produit un phénomène analogue à celui de la gelée dans certaines pierres de construction.

105. Pour le service des hauts fourneaux et des forges, on garde les charbons en halle sept à huit mois. Au delà de ce terme ils commencent à se détériorer sensiblement. Quand on est obligé de les conserver en tas exposés à l'air, on les abrite par des couvertures légères ; mais ils perdent beaucoup de leur qualité, s'ils y demeurent plusieurs mois.

Cependant les praticiens admettent que les charbons frais sont moins avantageux que ceux qui ont séjourné quelques mois dans les halles. Cette opinion tient sans doute au tassement du charbon de bois qui est toujours mesuré au volume et non au poids.

106. Les charbons de bois donnent des quantités de cendres qu'il est facile de calculer quand on connaît celles qui résultent de la combustion du bois, et les quantités de charbon que peuvent produire les différentes espèces de bois ; car les cendres du bois se trouvent toutes dans celles du charbon qu'il produit. Or, d'après le tableau (45), la quantité moyenne de cendres des différents bois est à peu près de 0,015, et en admettant le chiffre 0,20 pour la quantité de charbon produit, on trouve que la quantité moyenne de cendres que peuvent donner les différents charbons est de $0{,}015 \times \frac{100}{20} = 0{,}075$.

Mais ce nombre diffère notablement de celui qui est fourni par les expériences directes ; en effet les résultats obtenus par M. Violette pour le bois de bourdaine n'ont jamais indiqué plus de 0,015 de cendres ; il est vrai que M. Sauvage, ingénieur des mines, donne pour le charbon fabriqué dans les forêts la composition suivante :

Carbone	0,790
Matières volatiles	0,131
Cendres	0,079

d'autre part Faisst donne pour diverses variétés de charbon de bois les compositions suivantes :

NATURE DU CHARBON.	EAU.	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE et AZOTE.	CENDRES.
Charbon de hêtre en meule...	7,23	88,89	2,41	1,46	3,02
— dur (fabrique d'acide acétique)..	6,04	85,18	2,88	3,44	2,46
Charbon léger (fabrication du gaz)	8,21	87,43	2,26	0,54	1,56

M. Ebelmen a trouvé les résultats suivants :

NATURE DU CHARBON.	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE.	CENDRES.
Charbon de peuplier	87,22	3,20	8,72	0,86
— de chêne	87,68	2,83	6,43	3,06

Ces charbons avaient été desséchés préalablement à 140° et avaient perdu le premier 5, 2 pour 100 ; le second, 6 pour 100 de leur poids.

Les nombres trouvés pour la quantité de cendres par Faisst et Ebelmen sont en désaccord notable avec ceux de M. Sauvage, mais ils se rapprochent de ceux qui ont été indiqués par M. Violette ; il y a lieu de remarquer que pour les charbons fabriqués en meules la proportion de cendres tend à s'accroître ; dans tous les cas elle est notablement plus faible que celle qu'on déduit de la composition

du bois ; cette différence ne peut s'expliquer qu'en admettant que les produits volatils emportent à la distillation une grande partie des matières minérales du bois.

Nous admettrons que les charbons fabriqués en meule contiennent en moyenne 3 à 4 pour 100 de cendres.

107. *Puissance calorifique.* — Les charbons ordinaires du commerce, privés de leur eau hygrométrique, dégagent sensiblement la même quantité de chaleur. C'est un fait constaté par de nombreuses expériences et connu depuis longtemps.

108. La quantité absolue de chaleur développée par la combustion du charbon, a été déterminée, au moyen du calorimètre à glace, par Laplace et Lavoisier, qui ont obtenu 7226 calories ; mais ces physiciens avaient pris, pour la chaleur qu'absorbe la liquéfaction de la glace, le chiffre 75, tandis que le nombre réel est 79 ; le chiffre obtenu doit donc être multiplié par 79 : 75, et il devient 7609. Hassenfratz, qui a répété ces expériences, a obtenu, après la même correction, 7580. Clément Désormes a trouvé seulement 7050. Les premières expériences ont été faites sur du charbon sec, la dernière sur le charbon ordinaire qui renferme toujours de 6 à 7 pour 100 d'eau ; en admettant 0,07, les deux premiers nombres deviendraient 7076 et 7049, nombres bien voisins de celui qui a été obtenu par Clément Désormes.

Nous avons vu que MM. Favre et Silbermann ont trouvé pour puissance calorifique du charbon de bois le nombre 8080 ; or ce nombre suppose le charbon de bois composé de carbone exclusivement ; en effet, le charbon avait été complétement privé de substances volatiles et en particulier d'hydrogène par une calcination prolongée, ou bien en le traitant successivement par le chlore, l'hydrogène et l'azote à la température du rouge naissant ; la puissance calorifique obtenue était ensuite rapportée au carbone renfermé dans les produits de la combustion.

Les mêmes observateurs ont trouvé que les charbons qui retiennent des traces d'hydrogène donnent à la combustion des nombres supérieurs à 8080 ; mais que les résultats corrigés de la proportion d'hydrogène fournie par l'analyse se rapprochent très-sensiblement du nombre moyen.

On pourra donc appliquer la règle de Dulong au calcul de la puissance calorifique du charbon de bois.

Suivant la température à laquelle ils ont été obtenus et les bois avec lesquels ils ont été préparés, les charbons de bois ont une

composition assez variable. Aussi les résultats d'analyse des charbons de bois sont-ils peu comparables, c'est ce qui ressort suffisamment des nombres donnés précédemment ; mais il résulte aussi de ces nombres qu'on peut accepter pour limites extrêmes des proportions constituantes, les nombres suivants :

Eau	5 à 7 pour 100.
Carbone	78 à 88
Hydrogène	2 à 4
Oxygène et azote	1 à 15
Cendres	3 à 4

109. Si on considère les analyses d'Ebelmen et celles de Faisst comme exactes, on voit que dans les charbons en meule secs on pourra supposer 88 pour 100 de carbone et 2 pour 100 d'hydrogène libre, ce qui donne pour puissance calorifique :

$$0{,}88 \times 8080 + 0{,}02 \times 34462 = 7800 \text{ calories},$$

et pour le charbon à 6 pour 100 d'eau et 4 pour 100 de cendres

$$7080 \times 0{,}90 - 0{,}06 \times 606{,}5 = 6984 \text{ calories, ou environ } 7000$$

pour des charbons de bonne qualité moyenne.

Mais il ne faut pas oublier que les charbons de bois sont de composition variable, qu'ils peuvent contenir plus ou moins de cendres, plus ou moins d'eau, plus ou moins d'hydrogène libre et qu'il ne peut résulter soit en plus, soit en moins, un écart de 700 à 800 calories pour la valeur de la puissance calorifique du charbon de bois.

110. Les valeurs relatives des différents charbons sous le même volume, et dans l'état où ils se trouvent ordinairement dans le commerce, sont évidemment dans le rapport de leurs densités apparentes, c'est-à-dire dans le rapport des poids du même volume.

111. *Charbon de Paris.* — On désigne ainsi un combustible artificiel formé de poudre de charbon de bois agglutinée par du goudron et soumise ensuite à une haute température dans des pots ou des caisses. Cette industrie, créée en 1846 par M. Popelin-Ducarre, a pris depuis un grand développement. Le charbon de Paris est en cylindres de $0^m,10$ de hauteur sur $0^m,03$ de diamètre ; il s'embrase assez facilement, brûle sans flamme ni fumée, avec une grande lenteur, en se recouvrant d'une épaisse couche de cendres. Un morceau bien allumé continue à brûler à l'air jusqu'à ce qu'il soit entièrement consumé. La lenteur de sa combustion le rend très-propre

aux usages domestiques. Il produit de 20 à 22 pour 100 de cendres ; par conséquent sa valeur calorifique est inférieure à celle du charbon de bois ordinaire qui n'en laisse que 6 à 7 pour 100.

Ce charbon se fabrique avec les poussiers de charbon de bois qui forment, dans les usines à fer, les déchets des halles, et qui s'élèvent en moyenne à 0,1 du charbon consommé dans ces usines. On emploie aussi une grande quantité de menu obtenu en carbonisant, dans les forêts, à l'aide d'un four portatif, de nombreux débris ligneux presque sans valeur. Les charbons menus sont d'abord broyés sous les meules, puis mêlés avec la moitié de leur poids environ de goudron des usines à gaz. La pâte est passée ensuite dans l'appareil à mouler qui la comprime fortement. Puis les cylindres de charbon sont chauffés dans des fours disposés de manière que la chaleur nécessaire à la carbonisation soit produite par la combustion des gaz qui se dégagent pendant cette opération. Ces fours sont composés de trois caisses rectangulaires en briques, superposées ; chaque rangée est séparée de la suivante par un espace libre de $0^m,15$ à $0^m,20$ de largeur, ayant la profondeur et la hauteur des caisses de calcination ; ces espaces libres communiquent par le bas avec un foyer, qu'on n'allume que pour la mise en train, et à différentes hauteurs avec les parties supérieures des caisses. Lorsque, par l'action du foyer, les caisses ont été amenées au rouge, on y introduit les cylindres moulés au moyen d'une pelle rectangulaire à grands rebords ; l'air extérieur, qui parcourt les faces latérales des caisses, brûle les gaz qui en sortent, et cette combustion maintient la température des fours. Quand la carbonisation est terminée, les cylindres sont retirés au moyen de la pelle qui a servi à les introduire et versés dans des étouffoirs, et on continue ainsi les opérations jusqu'à ce que les fours aient besoin de réparation.

On a proposé, depuis, d'autres moyens d'agglomération des charbons menus. L'un d'eux consiste à mêler le poussier de charbon avec du menu de houille grasse réduit en poudre fine, à former une pâte avec de l'eau, à mouler la pâte et à soumettre les cylindres desséchés à une température assez élevée pour réduire la houille à l'état de coke.

On a aussi employé de l'argile pour agglomérer le charbon. Cette dernière méthode présente plus d'avantages au fabricant que les autres ; mais le consommateur ne devrait admettre les charbons ainsi obtenus qu'autant qu'il aurait reconnu, par expérience, la quantité de cendres qu'ils produisent ; car la quantité d'argile pour-

rait varier dans des limites très-étendues sans qu'on s'en aperçût à la couleur. D'ailleurs, l'extension que l'accroissement du nombre des fabricants de charbon de Paris a donnée à cette fabrication est loin d'en avoir amélioré la qualité. On emploie beaucoup, pour obtenir ce produit, les fonds de bateaux à charbon de bois qui arrivent à Paris, et ces résidus sont très-chargés de matières non charbonneuses.

CHAPITRE V.

Tannée.

112. Le tan épuisé, qui n'est plus formé que de la partie ligneuse de l'écorce de chêne, sert de combustible dans un grand nombre de localités. Pour l'employer, on le comprime, encore humide, dans des moules de fer ordinairement circulaires ; les mottes qui résultent de cette opération sont séchées à l'air libre, et sont vendues pour le chauffage domestique des familles les plus pauvres. Les mottes renferment encore beaucoup d'eau, elles brûlent lentement et donnent beaucoup de cendres. C'est un combustible précieux dans les grandes cités, où en général les autres combustibles sont beaucoup plus chers. La production du tan étant peu considérable, son emploi sera toujours limité ; cependant un certain nombre d'usines, et en particulier les tanneries qui ont toutes des machines à vapeur, ont intérêt à les utiliser ; aussi la plupart d'entre elles cherchent à trouver, en les employant, le combustible qui leur est nécessaire.

113. D'après les déterminations de Saussure, l'écorce de chêne contient, en cendres, 6 à 7 pour 100 de la matière sèche ; d'après des déterminations directes dont nous parlons ci-après, cette proportion n'est pas moindre de 8 pour 100 dans la tannée qui sort des fosses : on peut admettre que la matière organique du tan épuisé présente à peu près la composition du bois, ce qui fournira pour la tannée sèche les nombres suivants :

Carbone	0,469
Hydrogène	0,056
Oxygène	0,395
Cendres	0,080
	1,000

La puissance calorifique de la tannée sèche sera donc :

$$0{,}469 \times 8080 + 0{,}0066 \times 34462 = 4016.$$

Dans les conditions ordinaires, la tannée sortant des fosses contient, comme nous le verrons plus loin, près de 70 pour 100 d'eau; on ne l'emploie guère qu'après une dessiccation à l'air libre, ou encore après l'avoir essorée par un passage à travers une presse-laminoir et elle contient alors à peu près 48 pour 100 d'eau et sa composition devient :

Carbone	0,244
Hydrogène	0,029
Oxygène	0,205
Eau hygrométrique	0,480
Cendres	0,042
	1,000

La puissance calorifique est alors représentée par

$$0{,}244 \times 8080 + 0{,}003 \times 34462 = 2075.$$

114. Les données d'expérience sur la puissance calorifique de la tannée sont peu nombreuses. Voici quelques résultats obtenus sur la tannée d'une usine de Montrouge qui, vu son travail, emploie du tan demi-fin. Les déterminations d'eau et de cendres ont été faites dans le laboratoire de M. F. Weil.

La tannée sortant de la fosse et simplement égouttée par un court séjour sur le sol, comme à l'ordinaire, contient 69, 4 pour 100 d'eau et 30, 6 seulement de matière sèche : aussi le poids de matière sèche n'est pas même la moitié de celui de l'eau que contient la tannée.

Cette tannée a été passée à travers une presse composée de trois cylindres, et qui est assez fréquemment employée dans les tanneries ; en sortant de cette presse-laminoir, elle contient encore 48, 5 pour 100 d'eau ; d'autres essais ont fourni 43 et 45 pour 100 d'eau ; la matière sèche contenue dans la tannée pressée ou essorée est donc comprise entre 51, 5 et 57 pour 100. La tannée, même épurée par la presse-laminoir, est donc loin d'être un bon combustible, elle est difficile à brûler et d'un faible effet calorifique, par suite de la grande quantité d'eau qu'elle contient.

La tannée, sortant de la fosse, a été étalée sur le sol, au soleil, en couche de $0^m,15$ à $0^m,20$ et remuée de temps en temps ; la température était de 17° à l'ombre ; après sept heures (de neuf heures du

matin à quatre heures du soir), la tannée contenait 45 pour 100 d'eau seulement ; passée à la presse-laminoir, elle n'a rien perdu.

Cette tannée a fourni une quantité de cendres représentée pour différents échantillons par 12ᵏ,4 ; 8ᵏ,54 et 7ᵏ,82 pour 100 kilogrammes de la matière sèche.

La densité de la tannée sortant de la fosse est égale à 1,074 environ ; elle est de 0,740 pour la tannée complétement desséchée. Voici le poids du mètre cube de tannée déduit de la pesée de la substance contenue dans un hectolitre sans autre tassement que celui qu'on lui fait subir dans les manœuvres habituelles :

Écorce moulue au sortir du moulin.....	166ᵏ	le mètre cube.
Tannée sortant de la presse à cylindres.....	334	—
Tannée sortant de la fosse.....	591	—

Ces déterminations ne sont évidemment qu'approximatives et doivent varier avec la nature de la tannée, et son état de dessiccation et de tassement.

La tannée, passée à la presse-laminoir, servait à alimenter une chaudière à vapeur à six petits bouilleurs ; la surface totale de chauffe était d'environ 78 mètres carrés ; la tannée arrive sur chaque côté de la grille par deux carneaux verticaux, qui livrent le combustible à la grille en se terminant par un talus : la surface de la grille était de 4 mètres carrés. Pendant l'expérience sur la quantité d'eau vaporisée, on n'a brûlé que la tannée elle-même, sans aucune addition de houille. Le foyer n'a de particulier que la grande surface de la grille et l'espace laissé au-dessus d'elle pour que la tannée puisse s'y trouver en une assez grande épaisseur. On a vaporisé 758 kilog. d'eau par heure, il y avait très-peu d'eau entraînée par la vapeur ; la consommation en tannée a été de 925 kilog., ce qui donne 0ᵏ,82 d'eau évaporée par kilog. de tannée simplement essorée à la presse-laminoir.

Nous pouvons chercher à déduire de cette expérience l'effet utile que fournirait la tannée complétement sèche. 1 kilogramme de tannée contenant 0ᵏ,48 d'eau ne contient que 0ᵏ,52 de matière sèche ; cette dernière a dû vaporiser non-seulement 0ᵏ,82 d'eau de la chaudière, mais encore 0ᵏ,48 d'eau contenue dans le combustible, soit 1ᵏ,30, et le nombre de kilogrammes d'eau que pouvait vaporiser 1 kilogramme de tannée parfaitement sèche serait de $\frac{1,30}{0,52} = 2,50$. Il est bon d'ajouter que, dans cet état de dessiccation parfaite, la combustion de la tannée serait évidemment meilleure et l'effet utile

en serait sans doute augmenté. Il y a donc intérêt à pousser aussi loin que possible, au moins autant que les frais de manutention le permettront, la dessiccation de la tannée.

Dans une usine où l'on essorait la tannée à l'aide de la presse hydraulique, on était parvenu à ne laisser que 15 pour 100 d'eau dans la tannée, en la soumettant à une pression de 500,000 kilogrammes par mètre carré, soit 50 kilog. par centimètre carré : avec une presse plus faible ne donnant pas 25 kilog. par centimètre carré, la tannée conservait encore près de 50 pour 100 d'eau. La durée de la pression doit être suffisamment prolongée pour que celle-ci présente toute son efficacité, c'est pourquoi la presse à cylindres, dans laquelle la compression dure très-peu, laisse toujours la majeure partie de l'eau dans la tannée. L'emploi des presses hydrauliques est d'un autre côté assez coûteux d'installation et de manutention.

Dans quelques tanneries de Château-Renaud, on emploie la presse hydraulique pour retirer l'eau de la tannée ; les presses sont agencées d'une manière particulière, et la tannée qu'on en retire brûle assez facilement.

Dans une autre tannerie des environs de Paris, une machine de 10 à 12 chevaux, sans condensation, consomme 4 mètres cubes de tannée provenant de la presse à cylindres par journée de onze heures. La mise en feu et en vapeur s'opère à la houille ; et même, quand la vapeur faiblit, on emploie un peu de houille sur la grille.

115. Nous pouvons comparer les résultats de l'expérience à ceux que nous a fournis le calcul ; si l'on suppose que les gaz de la combustion arrivent dans la cheminée à la température de 300°, la quantité de chaleur emportée par les gaz qui résultent de la combustion de 1 kilogramme de tannée à 48 pour 100 d'eau sera 802 calories.

D'après les expériences de M. Scheurer-Kestner, la perte par les refroidissements et le rayonnement, dans les fourneaux du genre de celui qui a servi aux expériences, n'est pas moindre de 20 pour 100 de la chaleur développée par le combustible, soit. . 415

On peut admettre que la perte occasionnée par la mauvaise combustion, par la portion de tannée qui se retrouve dans les carneaux et par celle qui passe à travers la grille n'est pas moindre de 15 pour 100, soit. 311

1528

Si nous retranchons cette quantité de 2075, puissance calori-

fique que nous avons trouvée théoriquement, il reste 547 calories ; or si l'on suppose que l'eau d'alimentation de la chaudière est originairement à 12° et que la vapeur fournie ait été à la pression de 5 atmosphères ; 1 kilogramme d'eau prendra 642 calories pour la vaporisation, et la quantité d'eau évaporée par 1 kilogramme de tannée essorée sera $\frac{547}{642} = 0{,}85$, nombre bien voisin de celui qu'a fourni l'expérience.

116. Les résidus qui proviennent du bois de teinture peuvent être employés comme la tannée, et les conditions de leur combustion doivent être à peu près les mêmes ; quant aux proportions d'eau retenue par la matière, soit après l'égouttage, soit après l'essorage, elles doivent aussi différer très-peu de celles que retient la tannée, et on peut admettre que les puissances calorifiques pour ces deux espèces de combustibles pris dans les mêmes conditions d'essorage doivent être à très-peu près identiques.

117. La sciure de bois forme un combustible qui se rapproche, par sa composition et par les procédés qu'on doit employer pour le brûler, de ceux que nous venons d'étudier. Quand le bois est encore vert, et que la sciure est fraîche, celle-ci ne contient pas moins de 50 pour 100 d'eau ; à cet état, sa composition peut être représentée par :

Carbone	0,250
Hydrogène	0,030
Oxygène	0,210
Eau hygrométrique	0,500
Cendres	0,010
	1,000

La puissance calorifique de la sciure dans cet état sera donc :

$$0{,}25 \times 8080 + 0{,}0038 \times 34462 = 2151 \text{ calories.}$$

Ce nombre est un peu plus élevé que celui que nous avons trouvé pour la tannée et cela tient à la moindre proportion de cendres. Quant à la quantité de vapeur que peut fournir 1 kilogramme de sciure, si l'on fait pour celle-ci le même calcul que pour la tannée, on trouve :

Calories emportées par la fumée	803
Pertes par refroidissement, etc	430
Perte par mauvaise combustion ou combustible non brûlé	322
Total	1555

Ces 1555 calories retranchées de la puissance calorifique totale 2151 donnent 596 calories comme différence, et par suite le poids d'eau évaporé par 1 kilogramme de sciure de bois sera : $\frac{596}{643} = 0{,}90$, nombre supérieur de $\frac{1}{19}$ à celui que fournit la tannée.

Quant à la puissance calorifique de la sciure de bois parfaitement desséchée, elle est égale à celle du bois lui-même ; au point de vue de la puissance calorifique industrielle, il y avait cependant à tenir compte des pertes sous la grille et par entraînement, résultant de la légèreté et du faible volume du combustible.

118. On a rarement observé quelles étaient les quantités de sciure produites par le sciage ; ces quantités sont évidemment proportionnelles aux surfaces de sciage et à l'épaisseur du trait de scie. Pour la volige à ardoises, 10 m. de bois débité donnent 2 mètres cubes de sciure, plus une certaine quantité de déchets, débités en cordes et vendus comme bois de chauffage.

Le chêne débité en feuilles de parquet fournit 3 mètres cubes de sciure pour 10 ou 12 mètres cubes de bois.

119. La tannée, les résidus de bois de teinture et la sciure de bois ne peuvent être brûlés de façon régulière que dans des foyers de forme particulière, sur lesquels nous donnerons quelques détails dans le livre V[e] ; M. Burnat a fait quelques expériences sur la combustion de la tannée et de la sciure de bois dans un de ces foyers, dû à M. Émile Muller ; l'appareil de vaporisation était une chaudière dite *à tombeau* dans laquelle on atteignait la pression de 1 atmosphère et demie.

Dans une première expérience, on a employé de la tannée seule, desséchée par un séjour de plusieurs semaines sur le massif d'une chaudière à vapeur ; on a évaporé $1^k{,}85$ d'eau par kilog. de combustible ; la température des gaz de la cheminée étant de 256°.

Dans une seconde expérience on a mélangé de la tannée et de la sciure de bois dans la proportion de 340 de la première pour 1025 de la seconde ; le résultat a été : $1^k{,}39$ d'eau évaporée par kilogramme de combustible ; température au registre, 253°.

Afin d'observer un terme de comparaison, on a brûlé dans le même foyer de la houille d'Épinac en morceaux, dont la puissance calorifique ne dépassait pas 6500 ; on a évaporé $4^k{,}54$ d'eau par kilogramme de houille ; la température au registre était de 250°.

Pour faire accorder les résultats trouvés par M. Buinet et ceux que nous avons indiqués plus haut, il suffirait de supposer que la tannée dans les expériences de M. Burnat contenait 18 pour 100 d'eau, et le mélange de tannée et de sciure 32 pour 100 d'eau.

120. Si les combustibles dont il s'agit étaient parfaitement secs, et si on ne considérait que la valeur de leur puissance calorifique théorique, on serait conduit à ce résultat que 2 kilogrammes de chacun d'eux vaudraient à peu près 1 kilogramme de houille.

121. Le chauffage à la sciure est fréquemment appliqué à des chaudières tubulaires isolées ou appartenant à des locomobiles ou à des machines mi-fixes. Il est évident que la chaudière tubulaire à retour de flamme favorise le développement de la combustion, et donne de meilleurs résultats que les autres types. Il y a des locomobiles de 5 à 15 chevaux chauffées à la sciure ; ces machines marchent avec de la vapeur à 5 ou 6 atmosphères sans condensation.

On trouve aussi des étuves pour la dessiccation des bois chauffées à la sciure et plus souvent avec des déchets de bois, copeaux, riflures, etc.

Pour la sciure comme pour la tannée, il y aurait lieu de recourir à de véritables gazogènes pour tirer le meilleur parti possible de ces combustibles inférieurs, et l'emploi des gazogènes devient indispensable si l'on veut obtenir à l'aide de ces combustibles des températures un peu élevées.

CHAPITRE VI.

Tourbe.

122. La tourbe est un combustible léger, spongieux, d'un brun noirâtre. Elle est formée de plantes herbacées, entrelacées, souvent reconnaissables, et dont la décomposition est plus ou moins avancée. Les tourbes renferment toujours une certaine quantité d'eau, de terre et de sable.

La tourbe prend naissance le plus souvent dans des plaines où l'eau qui s'écoule difficilement forme une nappe peu épaisse au sein de laquelle naissent et se décomposent les végétaux qui forment la tourbe. C'est le cas des tourbières des vallées de la Somme, de la Loire, de la Seine, etc. ; souvent le niveau de ces plaines est inférieur à celui des cours d'eau ; en Hollande, où existent d'immenses tourbières, elles se sont développées dans des plaines plus basses que la mer, séparées d'elle par des levées ou des dunes et où l'eau douce s'accumule ; enfin, la tourbe peut prendre naissance sur des déclivités ; certaines plantes s'y développent très-rapidement pourvu

que l'humidité du sol soit entretenue par des sources supérieures ou par les pluies et les brouillards.

On trouve aussi des dépôts anciens de tourbe qui ont été recouverts par des calcaires ou des sables comme à Madère et dans les marais Pontins.

123. La tourbe employée communément comme combustible provient des marais ; elle se présente avec des caractères divers : on appelle *tourbe mousseuse* celle qui provient de la décomposition de mousses, de joncs, etc., elle est formée de fibres entrelacées ; la *tourbe feuilletée* semble formée de feuilles superposées, elle provient de débris d'arbres dont elle contient les troncs et les branches. On distingue encore dans la Picardie les *tourbes à cendres*, qui paraissent être le résultat d'inondations ; les eaux qui ont envahi le sol y ont laissé déposer des débris de plantes, de coquillages, de sable, etc.

A la surface du sol la tourbe est lâche et formée de végétaux à peine décomposés ; à mesure que l'on s'enfonce davantage dans la couche, elle devient plus compacte, plus noire, et les débris organiques qui la composent sont plus altérés ; enfin, dans les dernières assises, elle ne laisse plus apercevoir de traces de végétaux.

La tourbe est rarement enfouie profondément ; elle est ordinairement recouverte d'une couche de terre ou de sable de quelques décimètres d'épaisseur. Les couches de tourbe atteignent souvent une grande épaisseur : on en connaît qui ont plus de 10 mètres. Les bancs de tourbe ont fréquemment une très-grande étendue. Ils sont beaucoup plus répandus dans le Nord que dans le Midi. Il arrive aussi que plusieurs couches de tourbe sont superposées et séparées par des bancs de sable et d'argile, comme on l'a observé en Hollande.

124. La tourbe provient sans aucun doute des débris de plantes aquatiques déposés successivement au fond des marais ; mais comme tous les marais ne renferment pas de la tourbe, il faut nécessairement admettre que sa formation exige ou des espèces particulières de végétaux ou des circonstances qui ne se rencontrent pas partout.

D'après M. Frémy, la tourbe est caractérisée par la présence, dans sa composition, d'une certaine quantité d'acide ulmique ; on y trouve comme dans le bois des fibres et des rayons médullaires qui résistent à l'action de l'acide azotique et se dissolvent dans les hypochlorites alcalins.

125. La tourbe brûle lentement et sans produire une très-haute

température, avec une fumée d'une odeur piquante fort désagréable. Les produits de la combustion de la tourbe sont assez complexes, parce qu'il est difficile de la rendre complète. Ils sont composés des mêmes éléments que ceux qui se dégagent de la combustion incomplète du bois ; on y trouve en outre de l'ammoniaque et de l'acide sulfureux.

Les tourbières les plus considérables de la France sont : 1° celles de la vallée de la Somme, entre Amiens et Abbeville ; 2° celles des environs de Beauvais ; 3° celles de la rivière d'Essonnes, entre Corbeil et Villeroi ; 4° celles des environs de Dieuze. La Hollande, la Westphalie, l'Autriche, la Bavière, l'Écosse et la Russie sont très-riches en tourbes.

La tourbe s'extrait en mottes carrées qui, desséchées, ont la grosseur d'une brique. Elle est ordinairement séchée sur le lieu même de l'exploitation, et renferme alors au moins 30 pour 100 d'eau qu'on ne peut dégager qu'en la chauffant à une température assez élevée. La tourbe, quand on l'extrait, a sensiblement la densité de l'eau, il faut sensiblement 10 mètres cubes de terrain pour faire une tonne de tourbe.

Au point de vue des usages domestiques et industriels, la tourbe présente un certain nombre d'inconvénients qui sont : l'odeur désagréable qu'elle répand en brûlant, sa faible densité, la grande quantité de cendres et d'eau qu'elle contient.

126. M. J. Kolb, ancien élève de l'École centrale, a fait dans le bulletin de la Société d'encouragement (1875), une monographie des tourbes de la Somme ; dans ce travail, il fait observer que la tourbe est un combustible qui se cultive presque sans frais ; sa culture pourrait donner, à surface égale, et dans des temps égaux, un rendement calorifique supérieur à celui du bois. Il faut de 30 à 40 ans pour obtenir un mètre d'épaisseur de tourbe ; mais on pourrait augmenter cette production par une culture intensive et rationnelle. M. Kolb pense qu'il y a lieu de se préoccuper de l'emploi de nos tourbes qui, suivant lui, valent largement celles dont l'industrie s'est emparée depuis longtemps dans d'autres pays.

Les tourbes de la Somme se divisent en tourbe feuilletée, tourbe mousseuse et tourbe à cendres.

Les tourbes des deux premières classes se vendent de 4 à 6 francs le mètre cube, celles de la troisième classe se vendent 2 à 3 francs le mètre cube.

Les tourbes simplement desséchées à l'air retiennent une quan-

tité d'eau d'autant plus grande qu'elles sont plus riches en matière végétale ; celles de Longueau, de Boves, de Longpré contiennent de 20 à 29 pour 100 d'eau ; les troisièmesqualités de Longpré, de l'Étoile, de Pont-de-Metz, tourbes à cendres, ne contiennent que 14,8 à 5 pour 100 d'eau. La densité absolue des tourbes est en moyenne 1,405 ; 1 mètre cube de tourbe sèche, finement broyée, pèse de 320 à 640 kilogrammes, en moyenne 496 kilog. ; un mètre cube de briquettes pèse 360 kilog. ; les tourbes d'Essonnes pèsent 275 kilog. le mètre cube ; celles de Nantes, 250 kilog. ; celles des Bouches-du-Rhône et de Bavière, de 290 à 300 kilog. Ce faible poids fait de la tourbe un combustible encombrant, léger, spongieux, et par suite brûlant trop vite.

Les bonnes tourbes de la Somme, celles de Longueau, de Condé, de Longpré, ne laissent à l'état sec que 8 à 9 pour 100 de cendres ; celles-ci ne produisent pas de mâchefer, tombent en fine poussière et n'encrassent pas les grilles. Les tourbes de Nantes ont 15 pour 100; celles des Vosges 16 ; du comté de Mansfeld, 29 ; celles d'Italie, de 17 à 24 ; celles d'Essonnes, 21 ; du duché de Brunswick, 19.

Les tourbes à cendres sont brûlées en plein air et leurs cendres sont employées comme amendement ; ces cendres contiennent de la craie, du plâtre et de l'argile ferrugineuse : d'après leur composition, ces tourbes sont vendues tantôt plus cher, tantôt meilleur marché que ne le serait un mélange identique des substances qui les constituent.

127. Les tourbes extraites comme nous l'avons dit sont en général spongieuses et contiennent des quantités de terre plus ou moins considérables. On a fait beaucoup d'essais pour séparer de la tourbe les matières étrangères qui s'y trouvent, et pour en augmenter la densité. A Montauger, près de Corbeil, M. Challeton a essayé le procédé suivant : La tourbe extraite au louchet ou à la drague est amenée à l'usine, par des canaux ménagés dans la tourbière ; elle est élevée par une chaîne à godets et introduite, avec une suffisante quantité d'eau, dans une grande cuve dans laquelle se meut un arbre vertical garni d'ailes horizontales armées de crochets très-nombreux ; la tourbe est divisée, les parties organiques qui avaient conservé leurs formes sont déchirées, et le produit de cette action mécanique est une bouillie claire, qu'une chaîne à godets élève constamment pour la verser dans un canal en planches situé au-dessus du sol. Ce canal la conduit dans des bassins dont le fond est formé par le sol recouvert de nattes ; en quatre ou cinq heures la

plus grande partie de l'eau renfermée dans la tourbe s'est écoulée. La couche de tourbe de chaque bassin est alors divisée en briques qu'on laisse dessécher sur le sol, suivant la méthode ordinaire. Après quatre mois de dessiccation à l'air libre, la tourbe renferme encore 0,16 d'eau. On n'a pu obtenir ainsi, comme on l'espérait, une tourbe compacte, dure et homogène. Ces qualités eussent été très-importantes pour la combustion dans les foyers à grand tirage, parce qu'alors il y a peu de matières combustibles entraînées par le courant, et pour la carbonisation, parce qu'il se produit peu de menu et que le charbon est plus dense. La tourbe ainsi préparée ne contient que peu de terre, car celle-ci s'est déposée, par suite de sa plus grande densité, au fond des cuves à broyer, d'où elle est enlevée de temps en temps. Dans ce mode de préparation, le travail était produit par une machine à vapeur dont le générateur était alimenté par la tourbe brute. Ces procédés de fabrication ont été abandonnés par suite d'une augmentation trop considérable du prix de revient de la tourbe.

A la Saussaye (Seine-et-Oise), au moyen de broyages combinés avec un lavage alcalin, puis d'une dessiccation à l'air libre, on obtient des briquettes dont la densité est 1,3, qui contiennent 7 pour 100 de cendres et qui brûlent comme la houille.

On a cherché aussi à comprimer la tourbe à sec ; la tourbe à moitié séchée est brisée au moyen d'un rouleau. On recueille le menu ; on sépare les fragments les plus gros par un tamisage, les plus fins sont séchés par la chaleur perdue d'un générateur, puis, lorsqu'ils ne contiennent plus que 12 à 15 pour 100 d'eau et qu'ils sont portés à 50 ou 60°, on les comprime très-fortement. La densité des briquettes obtenues ainsi est de 1,5 environ ; ce procédé a été appliqué aux tourbières d'Haspel près d'Augsbourg.

Il y a lieu de penser que ces différents procédés de malaxation et d'agglomération des tourbes n'ont produit que peu de résultats, car ils ne paraissent pas s'être répandus.

M. E. Lavigne, ingénieur civil des mines, emploie à Saint-Martin-Longuau le procédé suivant pour améliorer la tourbe ; celle-ci est, aussitôt après son extraction, jetée dans un bateau avec une quantité d'eau suffisante, on la divise au moyen de pelles en bois et on la soumet à un *marchage* qui la rend homogène ; on la moule ensuite dans des moules à claire-voie, et les briquettes de $0^m,33$ de long et de $0^m,09$ de large sont ensuite étendues sur le sol ; après huit jours, les briquettes sont relevées sur champ ; après une nou-

velle période de huit ou de quinze jours, on les dispose en tas de dix, en laissant des interstices pour la dessiccation, après une nouvelle durée de huit ou de quinze jours, la pile est reformée de haut en bas et quelques jours après, on les dispose en piles de 20000 briquettes qu'on recouvre de roseaux et de laiches. Après un mois la tourbe peut être employée au chauffage, mais on ne lui fait subir la carbonisation qu'après un an d'empilage. On réserve pour cette dernière opération les tourbes choisies. Ce procédé est l'objet d'une exploitation régulière et donne de bons résultats.

128. La tourbe est un combustible encombrant dont le transport grève rapidement le prix de revient et qui doit pour cette raison être consommée presque sur place, elle convient particulièrement à des chauffages qui ne réclament pas une température élevée ou dans lesquels il est nécessaire d'éviter les coups de feu ; la cuisson du plâtre, celle de la chaux, le chauffage du bitume, etc.

129. Pour améliorer la tourbe, on a eu recours à la dessiccation artificielle ; la tourbe ne doit pas être chauffée au delà de 100°, car à partir de cette température elle se décompose ; des séchoirs de forme et de construction diverses ont été employés pour cette opération ; on les chauffe soit avec de la tourbe, soit à l'aide de gaz de hauts fourneaux, soit à l'aide des chaleurs perdues des générateurs. Ce traitement de la tourbe est tout particulièrement recommandable quand on peut employer la tourbe immédiatement après sa sortie de l'étuve de dessiccation ; si on devait attendre un certain temps pour s'en servir, la tourbe reprendrait tout ou partie de l'eau qu'on lui avait fait perdre.

130. A Derrylea, près de Portarlington (Irlande), on exploite la tourbe en établissant d'abord un drainage qui détermine un premier asséchement de la couche supérieure ; on facilite cette dessiccation, en ameublissant cette couche supérieure sur une profondeur de $0^m,025$ à $0^m,05$; par un temps suffisamment beau cette couche est suffisamment sèche pour être enlevée à la brouette et transportée ensuite au moyen de wagons à l'usine où on la dessèche artificiellement ; voici les proportions d'eau que contient la tourbe aux différentes phases de l'extraction :

	Eau.	Tourbe.
État primitif	90	10
Après le drainage	84	16
Surface supérieure de la partie drainée	75	25
Après quelques heures de dessiccation à l'air libre...	60	40

Dans ce dernier état, la tourbe est introduite dans des étuves de 152 mètres de longueur où elle circule sous l'influence de râteaux, d'abord sur un plancher supérieur chauffé au moyen de la vapeur d'échappement des machines, ensuite sur un plancher inférieur chauffé au moyen des chaleurs perdues des fourneaux ; la tourbe desséchée est remontée au moyen de norias dans des trémies qui la distribuent aux presses ; ces presses sont formées d'un piston cylindrique en acier qui, par un mouvement de va-et-vient, force l'introduction dans un tube en acier de la tourbe qui se trouve au fond de la trémie, à chaque coup de piston une rondelle de tourbe se forme dans le tube, d'où la tourbe comprimée sort sous la forme d'un cylindre, qu'on divise facilement en rondelles. Dans ces conditions la tourbe est beaucoup moins hygrométrique et sa puissance calorifique est considérablement accrue. Le seul combustible employé est celui qui est brûlé sous les fourneaux des machines. Le mémoire de M. Ch. Hodgson, traduit par M. le général Morin (*Annales du Conservatoire*, 1866), ne donne pas la dépense en combustible et en main-d'œuvre que nécessite cette préparation de la tourbe.

131. Enfin, et nous aurons l'occasion de revenir sur cette question, on utilise la tourbe pour alimenter des foyers à haute température en la convertissant en gaz après une dessiccation convenable, au moyen d'un gazogène ; dans certaines forges, on alimente ainsi des fours à réverbère.

132. *Puissance calorifique.* — La qualité de la tourbe étant très-variable, même dans chaque exploitation, et les quantités d'eau et de cendres qu'elle renferme l'étant également et dans des limites très-étendues, on ne peut rien dire de bien positif sur la quantité de chaleur que produit la tourbe par sa combustion.

Des expériences faites sur une grande échelle par M. Garnier, ingénieur des mines, indiquent pour la tourbe une puissance calorifique égale à peu près à la moitié de celle de la houille. Ces expériences ont été faites sur la tourbe des marais de Brêles, près de Beauvais. Les tourbes de ces marais sont d'un gris noirâtre, sans mélange de substances terreuses ; elles éprouvent un grand retrait par leur dessiccation, car leur longueur, qui est d'environ $0^m,325$ au moment de leur extraction, se réduit ensuite au tiers. On distingue dans cette localité six variétés de tourbe : les deux dernières ne sont bonnes que pour faire des cendres.

Les essais ont eu lieu sur la chaudière d'une machine à vapeur à haute pression de la force de 20 chevaux. M. Garnier a trouvé que,

pour produire le même effet avec la houille et la tourbe de seconde qualité, il fallait un poids double de ce dernier combustible.

133. La tourbe limoneuse de première qualité, des environs d'Essonnes, me paraît approcher beaucoup de celle dont il vient d'être question ; car, d'après des expériences faites avec soin, elle ne laisse après sa combustion que 7,41 pour 100 de cendres.

134. D'après M. Sauvage, ingénieur des mines, la tourbe de Bar (Ardennes) est composée ainsi qu'il suit : carbone, 0,22 ; matières volatiles, 0,67 ; cendres, 0,11. Il estime à 0,16 la valeur en carbone des matières volatiles, ce qui porterait à 0,38 celle de la tourbe sèche ; et il dit que cette tourbe desséchée à l'air a la même puissance calorifique que le bois.

Le tableau suivant renferme le résultat des analyses faites par MM. Regnault et par M. de Marselly sur la composition des tourbes.

DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES.	COMPOSITION							
	AVEC LES CENDRES.					SANS LES CENDRES.		
	C	H	O	Az	Cendres	C	H	O et Az
Tourbe de Vulcaire, près Abbeville (M. Regnault).....	57,05	5,63	29,55	2,21	5,58	60,40	5,96	38,64
Tourbe de Long (M. Regnault).....	58,09	5,93	31,37	»	4,61	60,89	6,21	32,90
— de Framont (id.).....	57,79	6,11	30,77	»	5,33	61,05	6,45	32,50
— de Thésy (M. de Marsilly)..	50,67	5,76	34,95	1,92	6,70	54,31	6,17	39,52
— de Camon — ..	46,11	5,99	35,87	2,63	9,40	50,89	6,61	42,50

Un certain nombre de tourbes d'Irlande indiquées par M. Percy dans son traité de métallurgie ne diffèrent guère des précédentes que par une quantité moins forte de cendres.

135. Calculons la puissance calorifique des deux tourbes du tableau, dont les compositions s'écartent le plus l'une de l'autre, en les considérant comme privées de cendres et d'eau.

La tourbe de *Framont* contient 61,05 de carbone et 2,39 pour 100 d'hydrogène libre, sa puissance calorifique sera :

$$61{,}05 \times 8080 + 2{,}39 \times 34462 = 5756.$$

Si on admet dans cette tourbe 25 pour 100 d'eau, la proportion des cendres se réduit à 4 pour 100 et la puissance calorifique devient :

$$5756 \times 0{,}71 - 0{,}1651 \times 606{,}5 = 3804.$$

La tourbe de Camon contient 50,89 de charbon et 1,30 pour 100 d'hydrogène libre, sa puissance calorifique sera :

$$50{,}89 \times 8080 + 1{,}30 \times 34462 = 4560 ;$$

si cette tourbe contient 25 pour 100, d'eau la proportion des cendres sera 7,05 pour 100 et sa puissance calorifique est alors :

$$4560 \times 67{,}95 - 0{,}367 \times 606{,}05 = 2876.$$

Les puissances calorifiques des tourbes hydratées sont calculées en supposant que l'eau des produits de la combustion ne se condense pas.

136. D'après ces calculs, la puissance calorifique moyenne de la tourbe sèche étant de 5153, elle excède de beaucoup celle du bois, parce qu'elle renferme plus de carbone et plus d'hydrogène en excès; elle excède même la moitié de celle de la houille, qui est moyennement de 8500, comme nous le verrons bientôt. Mais il faut remarquer que les essais ont été faits sur des tourbes complétement desséchées; et comme les tourbes, telles qu'elles sont livrées à la consommation, ont été seulement desséchées par leur exposition à l'air, elles renferment encore de l'eau en proportion très-notable. Cette circonstance ne permet alors d'estimer la puissance calorifique des tourbes qu'autant qu'on connaît la quantité d'eau qu'elles renferment et la quantité de cendres qu'elles produisent.

D'après le journal *l'Ingénieur* (1856), la tourbe des tourbières des environs de Laybach, qui ont une étendue de plus de 160000 hectares, sur une épaisseur comprise entre 4 et 10 mètres, est brune, compacte, sans aucune trace apparente de végétaux. Elle est formée de 65,59 de carbone, 5,60 d'hydrogène, 24,67 d'oxygène, 2,04 d'azote et de 2,10 de cendres. Cette composition équivaut, sous le rapport de la puissance calorifique, à 65,59 de carbone et 2,52 d'hydrogène libre, et par suite sa puissance calorifique serait de 59,00. D'après cela, la puissance calorifique des tourbes varierait dans des limites plus étendues que celles qui résultent des expériences faites par M. Regnault, et augmenterait à mesure que la décomposition de la matière végétale serait plus avancée.

137. Comme la valeur réelle d'une tourbe dépend principalement de la quantité d'eau hygrométrique qu'elle renferme, et de la quantité de cendres qu'elle produit, on obtiendrait une estimation bien plus rapprochée de la valeur d'une tourbe, en admettant le nombre 5150 pour la puissance calorifique d'une tourbe sèche ne con-

tenant pas de cendres, et en déterminant, par expérience, les quantités d'eau hygrométrique et de cendres. Si la tourbe avait une composition chimique notablement différente de celles qui ont été analysées par M. Regnault, le nombre 5150 devrait être remplacé par un autre facile à calculer; pour les tourbes de Laybach, ce nombre serait 5900.

138. Pour les tourbes, encore plus que pour les bois, il y aurait un grand avantage à enlever presque complétement l'eau qu'elles renferment, par une dessiccation faite au moyen d'un courant d'air chaud. Cette dessiccation serait d'autant plus avantageuse qu'elle pourrait s'effectuer par la chaleur perdue des appareils de chauffage, et ne coûterait que les frais de main-d'œuvre. Lorsque la tourbe est desséchée, elle développe plus de chaleur, sa combustion est plus vive et produit une plus haute température. Pour tous les usages métallurgiques, la dessiccation de la tourbe est indispensable.

139. Jusqu'ici la tourbe a été rarement employée dans les grandes industries; mais, actuellement, on s'occupe sérieusement d'utiliser les immenses tourbières disséminées sur presque tous les points de l'Europe.

CHAPITRE VII.

Charbon de tourbe.

140. Le charbon de tourbe est en général très-poreux, il brûle facilement et très-lentement à cause des cendres qui s'accumulent à sa surface; des morceaux de charbon, séparés d'un foyer, continuent à brûler jusqu'à ce que tout le carbone ait disparu.

Le charbon de tourbe peut s'obtenir, comme celui de bois, par plusieurs procédés différents, en vases ouverts ou en vases clos.

141. La carbonisation de la tourbe, par la méthode généralement employée dans les forêts pour la carbonisation du bois, présente beaucoup de difficultés, attendu que la masse s'affaisse davantage et qu'il se forme des crevasses par lesquelles l'air s'introduit dans le fourneau; en outre, le charbon de tourbe s'enflammant très-facilement, il faut attendre le refroidissement presque complet de la meule avant de l'ouvrir; enfin, par ce procédé, on obtient beaucoup de menu. Malgré les inconvénients que nous venons de signaler, la carbonisation en meules paraît être encore la seule usitée dans le Nord.

142. En conservant ce mode de carbonisation, on peut, au moyen d'enveloppes en maçonnerie, obvier presque à tous les inconvénients. La tourbe est placée dans un cylindre en maçonnerie, dont la surface est percée de nombreux ouvreaux distribués par rangées horizontales, et qu'on ouvre successivement en partant du haut; le cylindre est fermé par un couvercle en tôle. Mais quand on veut retirer le charbon, il faut encore attendre le refroidissement complet du fourneau.

143. A Crouy, près de Meaux, la carbonisation de la tourbe s'effectuait dans une enveloppe en maçonnerie de faible épaisseur, chauffée extérieurement par les gaz qui sont ensuite brûlés dans le foyer. Les produits de la distillation sont recueillis. Quand l'opération est terminée, le charbon encore incandescent est reçu dans des étouffoirs, placés au-dessous du four, et on peut immédiatement faire une nouvelle opération. Le mètre cube de tourbe de Crouy pèse 350 kilog.; on obtient un volume de 30 à 35 de charbon pour 100 de tourbe, et ce charbon renferme 0,65 de carbone et 0,35 de cendres. La charge du fourneau est de 25 hectolitres ou 875 kilog.; l'opération dure de vingt-deux à trente heures; on brûle 250 kilog. de tourbe dans le foyer à chaque opération (*Annales des Mines*, 1829). On pourrait craindre que, par ce procédé, la carbonisation ne fût trop rapide, du moins au commencement, et pour les parties voisines des parois chauffées, et que, par suite, le charbon ne fût trop divisé et réduit en trop petits fragments. Cet inconvénient serait surtout à craindre pour les tourbes compactes. Ce procédé paraît abandonné.

144. A Oberndorf, en Wurtemberg, on carbonise dans des fours cylindriques de 3 mètres de hauteur et de $1^{m},75$ de diamètre, la voûte du four est hémisphérique; à la partie inférieure se trouvent trois rangées de petits ouvreaux pour le tirage, la voûte présente un orifice à la partie supérieure. On peut fermer facilement ces diverses ouvertures; la carbonisation dure de six à sept jours.

145. On a proposé et essayé un grand nombre de procédés pour la carbonisation de la tourbe; l'opération en elle-même est facile à réaliser; mais il est nécessaire de tenir compte de la friabilité du charbon de tourbe, cette considération fait écarter tout d'abord les fours coulants, etc., et en général tous ceux dans lesquels les briquettes de tourbe sont exposées à tomber ou à rouler les unes sur les autres.

146. Le procédé le plus simple et qui paraît le mieux réussir, consiste à introduire la tourbe dans des cylindres en tôle de 2 mètres de

hauteur environ ; ces cylindres sont introduits au moyen d'une grue dans un fourneau ayant la forme d'une tour ronde, chauffé avec de la tourbe ou des débris ; on recouvre d'une tôle enduite de terre à l'intérieur et à l'extérieur. Le cylindre est aussi préservé de l'attaque des produits de la combustion par une couche semblable ; on accole une série de cinq ou six fours auxquels on donne une cheminée commune. Quand la carbonisation est complète, on enlève les cylindres qu'on remplace par d'autres ; on ne retire la tourbe carbonisée des cylindres qu'après refroidissement complet.

147. La distillation de la tourbe donne un gaz qui brûle avec une très-faible lumière, et un liquide oléagineux qui, par sa distillation, produit un gaz sept à huit fois plus éclairant que le gaz de la houille. Le mélange de ces deux gaz, brûlé dans les mêmes circonstances que celui de la houille, produit une lumière dont le pouvoir éclairant est compris entre 1,5 et 3,0, celui du gaz de la houille étant 1 (M. Foucault). Malheureusement ce mélange renferme beaucoup d'oxyde de carbone, et serait d'un usage dangereux.

148. D'après M. Blavier, la tourbe de Vesle, distillée en vases clos, donne pour résidu un charbon compacte, dont le poids est de 34,7 pour 100 parties de tourbe. En grand, on a obtenu de 40 à 41. On peut admettre, comme un résultat qui s'éloigne peu de la réalité, que les charbons provenant de tourbes de bonne qualité contiennent de 14 à 18 pour 100 de cendres.

149. D'après M. Sauvage, on fabrique le charbon de tourbe dans les Ardennes, avec la tourbe de Bar, dans des fours en maçonnerie ; le produit est de 44 p. 100 ; et le charbon est formé de 0,32 de matières volatiles et combustibles, de 0,43 de carbone et de 0,25 de cendres.

150. La tourbe distillée en vases clos fournit 60 pour 100 d'un gaz peu éclairant, mais qui peut brûler ; ce gaz contient, d'après M. de Marsilly, 40 pour 100 d'hydrogène, 30 pour 100 d'oxyde de carbone, 11 pour 100 d'hydrogène carboné ; il y a de plus 15 pour 100 d'acide carbonique qui détruit le pouvoir éclairant, mais dont on pourrait se débarrasser facilement ; dans tous les cas les gaz pourraient être employés au chauffage ; on recueille de plus de 1 à 2 pour 100 d'ammoniaque, suivant la qualité de la tourbe, 6 à 9 pour 100 de goudrons très-riches en acide phénique, en paraffine, en huiles d'éclairage et de graissage, en acide acétique et en esprit de bois ; ces divers produits sont utilisés en Allemagne ; on arrive à les isoler au moyen des procédés de M. Vohl. (J. Kolb.)

M. Lavigne décrit un procédé de carbonisation en vases clos dans lequel on recueille les produits de la distillation. Mais cette industrie n'est pas en activité. La Compagnie parisienne a essayé de faire du gaz d'éclairage avec la tourbe; mais outre que ce gaz renferme une forte proportion d'acide carbonique, il présente une odeur très-désagréable, et ces divers inconvénients ont fait renoncer à son emploi.

151. Le charbon de tourbe développe dans sa combustion les produits qui se forment dans celle du charbon de bois; mais en général les gaz qui se dégagent ont une odeur piquante et fort désagréable, qui provient très-probablement de ce que le charbon, dans sa préparation, n'a pas été soumis à une température assez élevée.

152. *Puissance calorifique.* Le charbon de tourbe renfermant toutes les cendres que contenait la tourbe qui l'a produit, et ces quantités étant très-inégales dans les différentes tourbes, la quantité de chaleur qu'il dégage par sa combustion est très-variable. On peut cependant regarder le charbon de tourbe comme devant produire une quantité de chaleur égale à celle qui serait produite par le charbon pur qu'il contient. Le charbon de tourbe d'Essonnes, sur 100 parties, donnant 18,2 de cendres, résultat moyen de plusieurs expériences faites avec beaucoup de soin, il en résulte que sa puissance calorifique est 6610.

CHAPITRE VIII

Combustibles fossiles.

LIGNITES. — HOUILLES. — ANTHRACITES.

153. Les différents combustibles que nous avons examinés jusqu'ici ont tous une origine végétale évidente. Ceux qui nous restent à étudier ont probablement tous aussi la même origine, mais elle n'est manifeste que dans certains lignites. Les houilles et les anthracites ont une pâte homogène dans laquelle il est impossible de découvrir les plus légères traces de structure organique; mais comme il y a un passage continu des lignites conservant la structure des plantes qui les ont formés, aux houilles et aux anthracites, il n'est pas permis de douter de la communauté d'origine de ces différentes substances.

154. Au point de vue chimique, les divers combustibles fossiles ont été caractérisés par M. Frémy par des réactions simples. Nous avons déjà indiqué celles qui caractérisent le bois et la tourbe; cette dernière formant le premier degré d'altération de la matière ligneuse.

Le second degré d'altération constitue, d'après M. Frémy, le bois fossile ou lignite xyloïde; il est en partie soluble dans les alcalis et se dissout presque entièrement dans les hypochlorites alcalins.

Le troisième degré d'altération donne le lignite compacte ou parfait; les dissolutions alcalines n'agissent pas ou agissent peu sur lui; il est complétement soluble dans les hypochlorites alcalins et dans l'acide azotique.

Le quatrième degré d'altération fournit la houille insoluble dans les dissolutions alcalines et les hypochlorites alcalins.

Le cinquième état d'altération est l'anthracite, qui se rapproche du graphite; il résiste aux réactifs pouvant modifier les combustibles précédents et que l'acide azotique n'attaque qu'avec une extrême lenteur.

155. Au point de vue géologique, on rencontre la tourbe dans les terrains d'alluvion les plus modernes; au-dessous, dans les terrains tertiaires, se trouvent les lignites; on les rencontre encore dans les couches supérieures des terrains secondaires, mais ils disparaissent des couches inférieures qui ne contiennent plus que de la houille; enfin les terrains intermédiaires renferment l'anthracite. Il semble, d'après cela, que la formation de l'anthracite remonte à l'époque la plus reculée, que la houille est moins ancienne, et le lignite plus moderne encore.

Nous n'entrerons pas dans les détails géologiques des gisements des combustibles fossiles, ni dans les détails des modes d'extraction : nous sortirions du cadre que nous nous sommes tracé; mais nous étudierons avec soin ces combustibles sous le rapport de leurs effets calorifiques.

Lignites.

156. Les lignites se présentent sous des aspects très-différents. Tantôt ils ont une couleur brune et une texture ligneuse, et quelquefois une apparence terreuse; tantôt ils sont noirs, à structure ligneuse, ou en masse homogène, à cassure résineuse. Les lignites se distinguent par deux propriétés caractéristiques: 1° ils sont en grande partie formés d'une matière soluble dans la potasse, désignée anciennement sous le nom d'*acide ulmique;* 2° ils donnent

pour produit de leur distillation un charbon pulvérulent ou de même forme que la masse distillée. Jamais ces deux caractères ne se trouvent réunis, ni dans les houilles ni dans les anthracites.

157. Les lignites terreux sont employés comme combustibles ; il en est qui, par une plus profonde altération, ont acquis une structure schisteuse et sont accompagnés de pyrites, et qui pour cette raison sont employés dans d'importantes exploitations d'alun.

On trouve en France des dépôts plus ou moins considérables de lignite terreux aux environs de Soissons et de Laon, dans le département de l'Aisne ; à Montdidier, dans le département de la Somme ; à Sainte-Marguerite, près de Dieppe ; à Ruelle, dans le département des Ardennes ; à Polieuc, près d'Orange, dans le département de Vaucluse.

158. Les lignites compactes ont la plus grande analogie avec la houille : ils en portent souvent le nom, et peuvent la remplacer dans la plupart des usages qui n'exigent pas les qualités spéciales des houilles grasses. Le jayet appartient à cette espèce.

Les lignites compactes forment souvent des bancs d'une grande puissance qui donnent lieu à de grandes exploitations. En France, on en trouve dans les environs de Marseille, de Toulon, de Vaucluse, de Ruelle (Ardennes).

159. Il y a en Italie des gîtes puissants de lignites qui, convertis en gaz au moyen de gazogènes, peuvent servir au chauffage des fours métallurgiques. Il y a également en Bavière, à quelques lieues de Ratisbonne, un gîte considérable de lignite à texture ligneuse qui est tellement imprégné d'eau, qu'on ne peut le brûler qu'à la suite d'une longue exposition à l'air ou d'une dessiccation artificielle ; il est sulfureux.

160. Les lignites présentent des compositions et des caractères très-différents, ainsi qu'on le verra dans les tableaux que nous donnons dans le chapitre suivant des analyses de M. Regnault d'une part, et de MM. Scheurer-Kestner et Meunier d'autre part.

On pourra distinguer, comme l'a fait M. Regnault :

1° Le lignite imparfait ou bois fossile ;

2° Le lignite parfait ou lignite proprement dit ;

3° Le lignite bitumineux.

Dans les lignites imparfaits la proportion de l'hydrogène à l'oxygène est de 1 à 5 ou à 6 ; le coke est analogue au charbon de bois.

Dans les lignites parfaits cette proportion est de 1 à 4 environ ; le coke est pulvérulent.

Enfin dans les lignites bitumineux elle est de 1 à 2 ou à 3 ; le coke qu'on en obtient est boursouflé.

161. *Puissance calorifique des lignites.* — MM. Scheurer-Kestner et Meunier ont déterminé les puissances calorifiques d'un certain nombre de lignites ; voici les valeurs qu'ils ont obtenues :

	CARBONE FIXE.	PUISSANCE CALORIFIQUE		OBSERVATIONS
		OBSERVÉE.	CALCULÉE.	
Bois fossile passant au lignite.	76,0	6311	5827	Lignites imparfaits.
Lignite passant au bois fossile.	75,8	6358	5759	
— du rocher Bleu.....	87,2	6483	6295	
— de Manosque maigre..	68,1	6991	5782	Lignites parfaits.
— de Manosque gras....	67,3	7363	6533	
— russe de Toula.....	37,1	7687	7126	
— de Bohême gras.....	31,5	7924	8343	Lignite bitumineux.

En comparant les nombres de ce tableau, on voit qu'il est absolument impossible de se faire une idée exacte de la puissance calorifique d'un combustible d'après sa composition élémentaire. A l'inverse de ce qu'on trouvera pour les houilles, il semble que la puissance calorifique soit d'autant plus élevée que la proportion du carbone fixe, obtenue dans le coke, est moindre. Généralement, la puissance calorifique observée dépasse celle qu'on obtient par la règle de Dulong au moyen du calcul.

Pour les lignites parfaits (ceux de Manosque), l'excès est de 800 à 1,200 calories ; pour les lignites imparfaits il est de 500 à 600 calories seulement ; enfin, pour le lignite bitumineux, au contraire, la puissance calorifique est plus faible de 400 calories environ que la puissance calorifique calculée.

Si l'on compare deux lignites ayant presque exactement la même composition, le *bois fossile passant au lignite* et le *lignite maigre* de Manosque, on voit, contrairement à ce qu'on observera pour les houilles, que c'est celui qui donne la plus forte proportion de carbone fixe qui fournit la puissance calorifique la moins élevée.

Il y a lieu de signaler encore une autre anomalie entre le lignite russe de Toula à coke pulvérulent et le lignite bitumineux de Bohême ; ces deux lignites diffèrent très-notablement par leur composition élémentaire ; leurs puissances calorifiques calculées diffèrent de 1200 calories et leurs puissances calorifiques observées sont

presque égales ; il y a cependant cela de remarquable que la quantité de carbone fixe est sensiblement la même.

Pour résumer, et si l'on considère des échantillons de composition moyenne, on pourra adopter pour puissances calorifiques du combustible pur, c'est-à-dire ne contenant ni eau ni cendres, les nombres suivants :

Lignite imparfait ou donnant 75 pour 100 et au-dessus de carbone fixe à la distillation.....	6400 calories.
Lignite parfait ou donnant de 65 à 70 pour 100 de carbone fixe.....	7100 —
Lignite bitumineux ou donnant moins de 40 pour 100 de carbone fixe.....	7900 —

Houilles. — Anthracites.

162. Les houilles sont toujours noires, tantôt schisteuses, tantôt compactes; elles donnent lieu à d'immenses exploitations. Sous le rapport de leur conduite au feu, on peut, d'après M. Regnault, les ranger en cinq classes :

1° *Houilles grasses maréchales.* — Ces houilles sont d'un beau noir et présentent un aspect gras caractéristique; leur poussière est brune. Elles éprouvent au feu une espèce de fusion pâteuse et donnent un coke très-boursouflé, brillant, mais léger et peu avantageux pour les opérations métallurgiques. De toutes les houilles maréchales, la plus estimée est celle de Saint-Étienne; après, vient celle de Mons, désignée sous le nom de *fine forge;* elle a moins de corps que celle de Saint-Étienne, et résiste moins au vent du soufflet. Cette houille, brûlée sur grille, produit une chaleur extrême; mais par sa fusion pâteuse elle intercepte le courant d'air, brûle les grilles et exige beaucoup de soin de la part du chauffeur.

2° *Houilles grasses et dures.* — Ces houilles diffèrent des houilles maréchales par une moindre fusibilité; leur coke est plus dense et le meilleur pour les hauts fourneaux.

3° *Houilles grasses à longues flammes.* — Ces houilles sont encore moins collantes que les précédentes, les fragments s'agglutinent seulement; ces houilles sont les meilleures pour les grilles. Sous ce rapport, la houille de Mons, connue sous le nom de *flénu*, est en première ligne. Le cannel-coal du Lancashire appartient à cette variété.

4° *Houilles sèches à longues flammes.* — Ces houilles donnent un coke à peine fritté; souvent même les fragments n'ont qu'une adhé-

rence très-faible. Elles sont employées pour les grilles; elles brûlent avec une flamme longue, mais de peu de durée, et ne peuvent pas produire une chaleur aussi intense que les houilles précédentes.

5° *Houilles sèches à courtes flammes.* — Ces houilles donnent un résidu pulvérulent; elles brûlent difficilement et sont principalement employées pour la cuisson des briques et de la chaux, dans les brasseries, pour la dessiccation du malt, et dans l'économie domestique.

163. *Anthracites.* — L'anthracite ne change que très-peu d'aspect par la calcination, et les fragments ne se collent pas. Il brûle très-difficilement et n'est guère employé en Europe que pour la cuisson des briques et de la chaux; on l'emploie cependant dans le pays de Galles pour les hauts fourneaux; mais aux États-Unis d'Amérique on en fait une consommation immense pour les foyers domestiques et pour les chaudières.

Les houilles, en sortant de la mine, ne renferment souvent qu'une très-petite quantité d'eau qui ne s'élève guère qu'à 0,02; mais comme elles sont rarement abritées pendant les transports et dans les lieux où elles sont accumulées, elles peuvent en contenir des quantités considérables, surtout quand elles sont menues.

164. *Composition des houilles.* — Les premières analyses des combustibles fossiles ont été faites par Thomson; mais elles sont très-inexactes, parce que l'analyse organique n'avait pas atteint alors le degré de perfection auquel elle est parvenue depuis. Quelques années après, Karsten a donné la composition d'un grand nombre de variétés de houilles; mais, d'après M. Regnault, ces compositions, quoique plus exactes que celles de Thomson, sont loin de la vérité; la quantité d'hydrogène y est trop faible, presque constamment de moitié.

165. Le tableau suivant donne, d'après M. Regnault, la composition des lignites et des houilles. Les houilles, avant d'être analysées, avaient été complétement desséchées à la température de 120°. Les pertes ont varié de 1,36 à 1,60. La quantité d'azote est en général très-faible dans les anthracites, et dans les autres combustibles elle varie de 1,5 à 2. D'après cela, on a regardé les volumes réunis de l'oxygène et de l'azote comme représentant le volume du premier gaz:

DÉSIGNATION des COMBUSTIBLES.	LIEUX d'où ILS PROVIENNENT.	DENSITÉ.	NATURE du COKE.	POIDS DU COKE.	COMPOSITION. CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE ET AZOTE.	CENDRES.
COMBUSTIBLES DE LA FORMATION CARBONIFÈRE.								
Anthracites	Pensylvanie	1,462	Pulvérulent.	84,83	90,45	2,43	2,45	4,67
	Pays de Galles	1,348	—	89,72	92,56	3,33	2,53	1,58
	Mayenne	1,367	—	89,96	91,98	3,92	3,46	0,94
	Rolduc	1,343	—	86,96	91,45	4,18	3,12	2,25
Houilles grasses et dures	Alais (Rochebelle)	1,322	Boursouflé	76,29	89,27	4,85	4,47	1,41
	Rive-de-Gier (P. Henry)	1,315	—	73,34	87,85	4,90	4,29	2,96
Houilles grasses maréchales	Rive-de-Gier, 1	1 298	Tr.-boursouflé	66,72	87,45	5,14	5,63	1,78
	(Grand'Croix), 2	1,302	—	68,36	87,79	4,86	5,91	1,44
	Newcastle (Richardson)	1,280	—	»	87,95	5,24	5,41	1,40
Houilles grasses à longues flammes	Flenu de Mons, 1	1,276	Boursouflé	»	84,67	5,29	7,94	2,10
	5	1,292	—	»	83,87	5,42	7,03	3,68
	Rive-de-Gier.. Cimetière, 1	1,288	—	67,33	82,04	5,27	9,12	3,57
	2	1,294	—	66,11	84,83	5,61	6,57	2,99
	Couzon. 1	1,298	—	64,88	82,58	5,59	9,11	2,72
	2	1,311	—	60,28	81,71	4,99	7,98	5,32
	Lavaysse	1,284	—	52,77	82,12	5,27	7,48	5,13
	Lancashire (Cannel-coal)	1,317	—	55,35	83,75	5,66	8,04	2,55
	Epinac	1,353	—	59,97	81,12	5,10	11,25	2.53
	Commentry	1,319	—	63,16	82,72	5,29	11,75	0.24
Houilles sèches à longues flamm.	Blanzy	1,362	Fritté	54,72	76,48	5,23	16,01	2,28
COMBUSTIBLES DES TERRAINS SECONDAIRES.								
Anthracite	Lamure	1,362	Pulvérulent.	89,5	89,77	1,67	3,99	4,57
—	Macot	1,919	—	88,9	71,49	0,92	1,12	26,47
Houille	Obernkirchen	1,279	Tr.-boursouflé	77.8	89,50	4,83	4,67	1,00
—	Céral	1,294	Fritté	53,3	75,38	4,74	9,02	1,86
—	Noroy	1,410	Pulvérulent.	51,2	63,23	4.35	13,17	19,20
Jayet	Saint-Girons	1,316	Fritté	42,5	72,94	5,45	17,53	4,08
—	Bélertat	1,305	—	42,0	75,41	5,79	17,91	0,89
COMBUSTIBLES DES TERRAINS TERTIAIRES.								
Lignite parfait	Dax	1,272	Pulvérulent.	49,1	70,49	5.59	18,93	4,99
—	Bouches-du-Rhône	1,254	—	41,1	63,88	4.58	18,11	13,43
—	Mont-Mésiner	1,351	—	48,5	71,71	4,85	21,67	1.77
—	Basses-Alpes	1,276	—	49.5	70,02	5,20	21,77	3,01
Lignite imparfait	Grèce	1,185	Analogue	38,9	61,20	5,00	24,78	9,02
—	Cologne	1,100	au charbon	36,1	63,29	4,98	26,24	5,49
—	Usnach (bois fossile)	1,167	de bois	»	56,04	5,70	36,07	2,19
Lignite passant au bitume	Ellebogen	1,157	Boursouflé	27.4	73,79	7,46	13,79	4,96
—	Cuba	1,197	—	39,0	75,85	7,25	12,96	3,94
Asphalte		1,063	—	9,0	79,18	9,30	8,72	2,80

166. Il résulte de ce tableau que :

Pour les houilles grasses maréchales, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène est à peu près de 11 pour 100, et les quantités d'oxygène et d'hydrogène sont à peu près égales ;

Pour les houilles grasses et dures, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène est à peu près 9, et la différence des poids de ces deux gaz est encore très-petite ;

Pour les anthracites, la somme de ces deux gaz descend à 5 ou 6, et la quantité relative d'hydrogène diminue ;

Pour les houilles sèches à longue flamme, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène s'élève jusqu'à 16, et la proportion d'hydrogène diminue;

Enfin, dans les lignites, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène s'élève jusqu'à 25, et en même temps la proportion d'hydrogène diminue.

Ainsi les houilles grasses passent aux houilles sèches non flambantes par la diminution de l'oxygène et de l'hydrogène, et aux houilles sèches flambantes et aux lignites, par une augmentation de ces deux éléments, plus rapide pour l'oxygène que pour l'hydrogène. Alors la faculté de se ramollir au feu ne provient pas, comme on l'avait supposé, seulement de l'excès de l'hydrogène sur l'oxygène, mais encore de la quantité absolue de ces deux corps.

Comme nous l'avons déjà dit, on trouve une infinité de variétés de houilles entre les lignites et les houilles grasses maréchales, et entre ces dernières et les houilles sèches non flambantes.

167. MM. A. Scheurer-Kestner et Ch. Meunier-Dollfus ont fait une étude très-remarquable des combustibles de différentes espèces et de différentes provenances, non-seulement au point de vue de leur composition, mais encore au point de vue de leur puissance calorifique (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1868-69-71; *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1869; *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, tome XXV; 5e série, tome II).

La puissance calorifique des différents combustibles étudiés par ces expérimentateurs a été déterminée au moyen du calorimètre à combustions vives de MM. Favre et Silbermann; afin de rendre les résultats comparables avec les résultats obtenus pour d'autres combustibles par ces derniers observateurs, on a déterminé la puissance calorifique du charbon de bois qu'on a trouvée égale à 8100; dans les mêmes circonstances, MM. Favre et Silbermann avaient obtenu 8080.

Pour être bien sûr d'obtenir des résultats moyens exacts, on formait les échantillons soumis à l'expérience, en prenant une certaine quantité de combustibles, en des points différents, d'un tas de 20,000 kilogrammes; puis la masse obtenue était broyée finement et mélangée avec soin. C'était sur la poudre obtenue qu'on prélevait l'échantillon.

Le tableau suivant résume les résultats fournis par ces expériences. La première colonne du tableau donne la proportion du carbone renfermé dans le coke obtenu à la distillation, évaluée en centièmes du carbone total renfermé dans le combustible.

Les puissances calorifiques calculées ont été obtenues par la règle de Dulong, en supposant que l'eau formée à la combustion se condense complétement.

NATURE du COMBUSTIBLE.	CARBONE FIXE.	COMPOSITION DU COMBUSTIBLE								PUISSANCE CALORIFIQUE	
		AVEC L'EAU ET LES CENDRES					PUR.				
		Eau.	C	H	O et Az	Cendr.	C	H	et Az	OBSERVÉE.	CALCULÉE.
Houilles :											
de Ronchamp, I.....	80,67	séché	76,46	4,39	4,14	15,02	89,96	5,09	4,95	9163	8909
II.....	81.00	1,09	73,10	3,75	5,87	16,19	88,38	4,42	7,20	9117	8398
III.....	81.70	séché	76,23	4,06	6,91	12,80	87,43	4,56	8,01	9081	8403
De Sarrebrück : Dudweiler...	74,97	1,75	71,25	4,10	9,65	13,25	83,82	4,60	11,58	8724	7972
Altenwald.....	76,32	2,54	69,30	4,26	10.40	13,50	83,14	4,73	12,51	8633	7693
Sulzbach.....	79,86	1,63	73,27	4,55	10,09	10 46	83,05	4,95	12,00	8603	7654
Heinitz.....	76,40	1,79	70,33	4,30	12,01	11,57	80,49	4,71	14,80	8487	7619
Von der Heydt.	74,72	2,71	70,64	4,54	11,65	10,46	81,56	4.98	13,46	8462	7796
Friedrichsthal..	74,00	1,00	67,81	4,19	14,30	12,70	78,97	4,67	16,36	8457	7405
Louisenthal....	73,05	3,57	64.69	3,94	15,52	12,28	76,57	4,68	18,45	8215	7357
Du Creuzot : grasse (puits Chaptal)..	90,88	0,42	87,18	4 35	6,99	1,06	88,48	4,41	7,11	9622	8663
anthraciteuse (puits Saint-Pierre).....	95,66	1,76	87,36	3,47	3,75	3,63	92,36	3,66	3,98	9456	8584
mi-grasse (St-Paul)..	88,21	0,79	87,04	3,97	5,68	2,52	90,07	4,10	5,13	9425	8689
maigre (St-Paul)....	92,65	1,19	87,67	4,09	4,60	2 25	90,79	4,24	4,97	9263	8732
De Blanzy : Montceau.....	62,04	4,97	66,60	4,43	13,72	10,28	78,58	5,23	16,19	8325	7744
anthraciteuse....	85,65	2,01	67,04	3.62	6,38	20,95	87,02	4,72	8,26	9111	8340
D'Anzin.....	91,44	1,03	78,78	3,92	10,55	5,72	84,45	4,21	11,32	9257	8273
De Denain....	83,81	1,14	77,68	4,10	10,73	6,35	83,94	4,43	11,63	9050	8306
Pays de Galles : Bwlf.....	90,00	0,63	87,18	3,68	4,89	3,32	91,08	3,83	5,09	8780	8565
Powel-Duffryn.	87,04	0,63	88,36	3,86	3,31	3,72	92,49	4,04	3,47	8949	8691
Russes : Grouchewski (anthracite).....	98,1	4,08	91,20	1,27	1,88	1,57	96,66	1,35	1,99	8259	8176
Miouckl.	89,3	1,39	89,97	4,43	3,98	0,23	91,45	4,50	4,05	8695	8740
Coloubowski.....	76,7	4,88	77,47	4,75	11,48	1,42	82,67	5,07	12,26	8021	7804
Lignites :											
Du rocher Bleu.....	87,2	8,27	55,30	3,06	17,41	15,96	72,98	4,04	22,98	6483	6295
De Manosque gras.....	67,3	1,00	55,26	4,26	18,78	20,70	70,57	5,44	23,99	7363	6533
De Manosque maigre.....	68,1	7.62	58,68	4,15	24,65	6,70	66,31	4,85	28,84	6991	5782
De Bohême gras	31,5	2,39	72,03	7,78	14,24	3,56	76,58	8,27	15,15	7924	8343
Passant au bois fossile.....	75,8	10,41	57,06	4,05	21,68	3,80	66,51	4,72	28,77	6358	5759
Bois fossile passant au lignite.	76,0	10,60	57,72	3,89	23,78	4,01	67,60	4,55	27,85	6311	5827
Lignite russe de Toula.....	37,1	9,39	54,82	4,49	14,89	16,86	73,72	6,09	20,19	7687	7126

168. La première observation qu'il y a lieu de faire relativement à ce tableau, c'est que les puissances calorifiques calculées sont toutes inférieures aux puissances calorifiques observées; ce résultat était très-imprévu, et tous les ingénieurs étaient d'accord sur ce point que la puissance calorifique réelle d'un combustible fossile était au plus égale à celle que fournit le calcul. Déjà, cependant, MM. Favre et Silbermann avaient montré que pour bon nombre de corps il n'en est pas ainsi, c'est ce qui résulte du tableau que nous avons donné au n° 30; le gaz oléfiant, l'acide acétique, le formiate de méthyle, etc., sont dans ce cas; ce dernier en particulier a une

puissance calorifique qui dépasse de près d'un tiers la puissance calorifique calculée.

Dans le tableau qui précède, il n'y a que le lignite gras de Bohême qui fasse exception à ce que nous venons de dire, mais ce lignite paraît se rapprocher des bitumes par sa nature, et de cette constitution particulière de ce corps résulte une valeur particulière de la puissance calorifique.

169. Une seconde considération tout aussi importante que la précédente consiste en ce que la composition des houilles ne suffit pas pour en déterminer la nature. Si l'on compare, en effet, deux houilles ayant à très-peu près la même composition, celle de Ronchamp, II, et celle du Creuzot (puits Chaptal); la première est une houille grasse ordinaire et la seconde une houille grasse à courte flamme ; cette différence dans la nature est d'ailleurs accusée dans les résultats obtenus par MM. Scheurer-Kestner et Meunier sur deux points différents : 1° l'inégalité de la puissance calorifique qui est 9117 pour la première et 9622 pour la seconde; 2° l'inégalité dans la quantité du carbone fixe obtenu à la distillation, qui est 81,0 pour la première houille et 90,88 pour la seconde.

MM. Scheurer-Kestner et Meunier font remarquer que ces éléments varient dans le même sens, et ils en concluent que plus un combustible minéral est riche en carbone fixe, plus sa puissance calorifique dépassera celle qu'on détermine par le calcul. Cette conclusion n'a rien d'absolu : en effet, lorsque le combustible est du charbon presque pur (houille russe de Grouchewski), la puissance calorifique observée redevient à très-peu près égale à la puissance calorifique calculée, ce qu'on aurait pu prévoir *à priori;* il doit donc y avoir une proportion de carbone fixe pour laquelle l'excès de la puissance colorifique observée sur la puissance calorifique calculée est un maximum.

170. Comme contrôle de leurs expériences de laboratoire, MM. Scheurer-Kestner ont, dans des essais destinés à étudier les conditions générales de la combustion dans les foyers des chaudières à vapeur, déterminé la puissance calorifique industrielle d'un certain nombre des combustibles précédents, en les faisant brûler plusieurs jours sur la grille d'un générateur formé d'une chaudière à 3 bouilleurs et à 6 réchauffeurs; ils ont tenu compte des différentes portions suivant lesquelles se répartit la chaleur fournie par le combustible : vapeur formée, produits gazeux, etc. Nous n'avons, pour l'instant, à emprunter à ces essais, sur lesquels nous reviendrons

plus tard, que la quantité de chaleur fournie par les différents combustibles; elle est fournie par le tableau suivant :

COMBUSTIBLES.	PUISSANCE CALORIFIQUE observée.	RENDEMENT PRATIQUE en eau vaporisée à 0°.
Ronchamp, I	9081	8,72
— II	9117	9,16
Friedrichsthal	8457	7,73
Dudweiler	8724	8,25
Louisenthal	8215	7,29
Altenwald	8633	8,27
Heinitz	8487	7,83
Sulzbach	8451	7,76
Von der Heydt	8462	7,72
Blanzy, I	8325	7,41
— II	9100	8,69
Creuzot	9412	9,15
$\frac{1}{2}$ Creuzot, $\frac{1}{2}$ Ronchamp, I	9310	9,83
$\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{2}$ — II	9310	9,68
Charbon de bois	8080	7,62

De ces nombres, il résulte que si le rendement pratique n'est pas absolument proportionnel à la puissance calorifique, les rapports de ces deux quantités pour les diverses houilles essayées ne s'éloigne pas beaucoup de l'égalité ; on conçoit d'ailleurs que les conditions mêmes dans lesquelles se fait la combustion de chaque houille peuvent amener des différences assez notables, soit dans la quantité de chaleur rayonnée, soit dans la quantité de chaleur qui reste dans le gaz, soit dans la quantité de produits non brûlés.

171. Les travaux de MM. Scheurer-Kestner et Meunier sont venus montrer qu'une bonne classification des combustibles et en particulier des houilles ne peut être exclusivement fondée sur la composition élémentaire de ces combustibles. Les différentes classifications qui empruntent seulement leurs caractères à cette composition sont donc défectueuses, et cependant elles ne sont pas dénuées de toute valeur, car, en s'aidant des propriétés physiques de la houille et en constatant la façon dont elle brûle, on peut au moyen de la composition arriver à se faire une idée à peu près nette de la nature et de la valeur d'une houille déterminée.

172. M. Gruner a proposé une classification qui mérite une sérieuse attention (*Annales des mines*, 7e série, tome IV) ; les caractères sur lesquels elle repose sont surtout tirés de la façon dont la houille se conduit à la distillation.

Dans son mémoire M. Gruner passe en revue les propriétés des différentes espèces de houille ; c'est ce mémoire que nous prendrons pour guide dans l'étude que nous allons faire de ces combustibles.

173. Tous les combustibles carbonés, sauf peut-être certains pétroles et certains graphites, sont d'origine végétale ; à mesure que l'altération de la substance végétale devient plus avancée, la couleur se fonce, la densité augmente, l'oxygène et l'hydrogène disparaissent en partie, seulement l'oxygène paraît diminuer plus rapidement que l'hydrogène, de sorte que les différents degrés d'altération du combustible peuvent être caractérisés par le rapport $\frac{O}{H}$ ou bien encore par la proportion de charbon que fournit le combustible supposé sec et ne contenant pas de cendres ; c'est en partant de ces considérations qu'on peut établir les types suivants :

	Rapport $\frac{O}{H}$	Charbon fourni à la distillation par le combustible pur.
Cellulose.....	8	0,28 à 0,38
Bois.....	7	0,30 à 0,35
Tourbes et bois fossiles....	6 à 5	0,35 à 0,40
Lignites proprement dits..	5	0,40 à 0,50
Houilles.....	4 à 1	0,50 à 0,90
Anthracites.....	1 à 0,75	0,90 à 0,92

174. Les houilles peu chargées de cendres ont une densité comprise entre 1,25 et 1,35 ; en général, les plus riches en carbone sont les plus denses ; le poids du mètre cube de houille varie de 700 à 900 kilogrammes ; la composition des houilles est aussi très-variable. Voici les limites entre lesquelles varie la proportion de chacun des éléments de la houille supposée pure :

Carbone.....	75 à 93
Hydrogène.....	6 à 4
Oxygène et azote.....	19 à 3

La valeur d'une houille dépend 1° de son pouvoir calorifique ; 2° de sa cohésion ou de sa friabilité ; 3° de la nature et de la propriété des cendres, suivant qu'elles sont ou non fusibles et que par suite elles donnent ou ne donnent pas de mâchefer ; 4° du pouvoir agglomérant du combustible au feu.

175. M. Gruner divise les houilles en cinq types :

	COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE			RAPPORT $\frac{O}{H}$	CHARBON fourni à la distillation.	NATURE ET ASPECT DES CHARBONS.
	C	H	O			
Houilles sèches à longue flamme	75 à 80	5,5 à 4,5	19,5 à 15	4 à 3	0,50 à 0,60	Pulvérulent ou tout au plus fritté.
Houilles grasses à longue flamme (houilles à gaz)	80 à 85	5,8 à 5	14,2 à 10	3 à 2	0,60 à 0,68	Fondu, mais très-fendillé.
Houilles grasses proprement dites ou charbons de forge.....	84 à 89	5 à 5,5	11 à 5,5	2 à 1	0,68 à 0,74	Fondu, moyennement compacte.
Houilles grasses à courte flamme ou charbons à coke.....	88 à 91	5,5 à 4,5	6,5 à 5,5	1	0,74 à 0,82	Fondu, très-compacte, peu fendillé.
Houilles maigres ou anthraciteuses.....	90 à 93	4,5 à 4	5,5 à 3	1	0,82 à 0,90	Fritté ou pulvérulent.

Cette classification ne diffère de celle de M. Regnault que par le nom donné aux houilles du quatrième type ; M. Regnault les appelait houilles grasses et dures, nom qu'on leur donne dans le nord de la France, parce qu'elles *durent* au feu, mais en réalité elles sont très-friables.

Il est important de bien faire la différence entre les houilles sèches et les houilles maigres ; on réservera exclusivement ce dernier nom pour les houilles peu grasses qui passent aux anthracites.

Cette classification s'accorde avec les conditions d'âge géologique ; en effet, dans la plupart des bassins houillers, on constate que les couches supérieures sont les plus riches en matières volatiles.

176. *Houilles sèches à longue flamme ;* caractérisées par la nature du coke ; à la distillation, elles se fendillent, mais conservent leur forme ; c'est le *Sandkohl* des Allemands ; les houilles maigres de la cinquième classe donnent aussi un coke qui n'est ni déformé ni aggloméré, mais elles se distinguent des houilles sèches en ce qu'elles ont une flamme courte et claire, et donnent 80 pour 100 de coke, tandis que ces dernières ont une flamme longue et fuligineuse et, au maximum, 60 pour 100 de coke.

Les houilles sèches sont compactes, dures, peu friables ; leur densité est environ 1,5 ; le poids du mètre cube est de 700 kilog., leur cassure est conchoïdale, unie, plus ou moins esquilleuse ; de là le nom de *splintcoal* que leur donnent les Anglais ; leur couleur est rarement d'un noir pur, leur poussière est brune ; ce sont des charbons *flambants*.

Leur puissance calorifique, d'après M. Scheurer-Kestner, est en

moyenne de 8200 à 8300 ; celles qui sont plus rapprochées des lignites donnent 8000 ; et celles qui se rapprochent des charbons gras donnent 8500.

Les houilles sèches à longue flamme sont rares en France ; on peut citer celles de Noroy dans les marnes irisées des Vosges ; les houilles qui s'en rapprochent le plus donnent un coke légèrement fritté et forment la transition aux houilles grasses à longue flamme ; telles sont les couches les plus élevées de Blanzy et du Montceau (Saône-et-Loire), les charbons des parties hautes des bassins de l'Allier et de l'Aveyron et ceux du bassin de St-Éloi dans le Puy-de-Dôme.

Dans le Royaume-Uni, on trouve les charbons secs, en Écosse, dans le Derbyshire, le Staffordshire, où ils servent à l'état brut, en Écosse surtout, à alimenter les hauts fourneaux : voici quelques exemples de ces houilles :

ORIGINE DE LA HOUILLE.	COMPOSITION de la HOUILLE PURE.			MATIÈRES volatiles dans la houille pure.	NATURE ET ASPECT du COKE.	OBSERVATIONS.
	C	H	O et Az			
Moyenne de onze couches de la Silésie.....	78,87	5,14	15,09	»	Pulvérulent ou très-peu fritté.	Analyse du docteur Heintz dans l'ouvrage de M. Brix.
Moyenne de trois couches de la mine Königin-Louise (Haute-Silésie).....	80,39	5,16	14,45		Coke fritté.....	Extrait du même ouvrage, le charbon passe aux houilles grasses.
Houille de Hartley (Newcastle).....	79,54	5,63	14,83	39,05	Coke fritté.....	Analyse de M. de Marsilly.
Houille sèche de Louisenthal.....	76,87	4 68	18,45	41,00	Coke pulvérulent.	M. Sheurer-Kestner.
Moyenne des couches supérieures de Sarrebrück...	75,75	4,87	19,38	41,90	—	Analyse de M. Gash, de Sarrebrück.
Houille très-dure de la mine Louise (Haute-Silésie)...	74,16	5,57	20,27	»	—	Analyse du docteur Heintz.
Grande couche du Sud-Staffordshire (moyenne de quatre bancs).....	78,00	4,79	17,21	»	—	Extrait de la métallurgie de M. Percy.
Houille de Blanzy, pareille à la houille de Monceau..	78,26	5,35	16,39	43,00	Légèrement fritté.	Analyse de M. Regnault.
Splintcoal d'Écosse à la limite des charbons gras (moyenne de trois couches).....	80,98	5,42	13,60	»	Coke fritté.....	Métallurgie de M. Percy.
Moyenne du système supérieur de Sarrebrück....	75,75	4,87	19,38	45,51	Coke pulvérulent.	Analyse de M. Gash, de Sarrebrück.

Les houilles appartenant à ce type commencent à devenir collantes quand le carbone atteint 80 pour 100 et que l'oxygène des cend au-dessous de 15 pour 100 ; ce sont des charbons à coke fritté (sinter kohlen) ; ils forment la limite entre les houilles sèches et les houilles grasses.

Les houilles sèches marchandes ne vaporisent guère plus de 6 à $6^{kil},30$ d'eau à 112° ou $6^{kil},70$ à $7^{kil},50$ quand on les considère à l'état pur et sans eau, c'est ce qui résulte des nombres consignés au tableau suivant :

ORIGINE DES HOUILLES.	PROPORTION EN CENTIÈMES		POIDS D'EAU VAPORISÉE par kilogramme DE HOUILLE		OBSERVATIONS.
	d'eau.	de cendres.	marchande.	pure.	
Houille sèche de la mine Louise (Haute-Silésie).....	3,65	6,83	6,23	7,02	Expériences du docteur Brix.
Houille à coke fritté de la mine Gerhart (Saarbrück).	5,10	6,84	6,85	7,78	—
Houille sèche de la mine Léopold (Silésie supérieure)...	4,10	5,10	6,10	6,72	—
Houille sèche de Louisenthal.	2,57	12,28	6,06	7,29	Expérienc. de M. Scheurer-Kestner.
Houille sèche du Montceau..	4,97	10,28	6,20	7,41	—

177. *Houilles grasses à longue flamme* ou charbons à gaz — Ces houilles, étant distillées, s'agglutinent en une masse unique plus ou moins poreuse ; elles sont encore dures, tenaces, mais moins que les précédentes ; en Angleterre, on les appelle Cherry-Coal ; leur densité est comprise entre 1,28 et 1,50 ; elles sont faciles à enflammer et brûlent rapidement avec flamme et sans fumée, elles sont *flambantes ;* à la distillation, elles donnent :

Coke.....		60 à 68
Eau ammoniacale.	5 à 3	40 à 32 de matières volatiles.
Bitume.....	15 à 12	
Gaz.....	20 à 17	

Ce sont des houilles à gaz ; elles sont rarement employées à faire le coke métallurgique ; elles en donnent moins que le type suivant ; il est léger, friable et poreux.

La puissance calorifique de ces houilles est comprise entre 8500 et 8800 calories à l'état pur et sans eau, ainsi que l'ont trouvé MM. Scheurer-Kestner et Meunier pour les houilles grasses à longue flamme de Duttweiter, Sulzbach et Von der Heyt.

Ces houilles sont plus répandues en France que les charbons secs ;

elles forment les couches les plus élevées dans le Pas-de-Calais et la Loire ; Commentry et Blanzy en fournissent aussi ; à Mons, on les appelle *flenus gras ;* les flenus secs donnent un coke à peine fritté ; les bons charbons de Newcastle sont des houilles à gaz ; à Saarbrück et en Silésie, les charbons à gaz succèdent aux charbons secs en montant.

Les houilles du tableau suivant appartiennent à ce type :

ORIGINE DE LA HOUILLE.	COMPOSITION de la HOUILLE PURE.			MATIÈRES volatiles dans la houille pure.	NATURE ET ASPECT du COKE.	OBSERVATIONS.
	C	H	O et Az			
Houille de Commentry....	82,92	5,30	11,78	36,7 %	Coke fondu métalloïde.....	Analyse de M. Regnault.
— d'Epinac.....	83,22	5,23	11,55	37,3	Coke fondu, mais non boursouflé.	—
— de Soulzbach.....	82,57	5,02	12,41	36,0		
— de Dutweiler.....	82,90	5,10	11,97	36,2		
— de Heinitz.....	81,32	4,97	13,71	38,0	Coke fondu, peu boursouflé.....	Analyses de M. Gash.
Moyenne du système inférieur de Saarbrück.....	82,08	5,04	12,88	38,3		
Moyenne des sept couches inférieures de Friedrichsthal.....	80,25	5,23	14,52	40,00	—	Ce charbon est à la limite des charbons gras.....
Moyenne de trois couches de Bruay, Marlhes, Bully (Pas-de-Calais).....	83,42	5,82	10,76	36 à 39	Coke léger, bien fondu.....	Analyse de M. de Marsilly.
Flenu gras de Mons (moy. de quatres couches).....	85,20	5,66	9,14	31 à 32,8	—	— Ce charbon forme la transition aux houilles grasses ordinaires.

Les houilles grasses à longue flamme supposées sans eau ni cendres, et donnant 60 à 68 pour 100 de coke, vaporisent en moyenne 8 kilogrammes d'eau ; les limites sont $7^{kil},50$ pour les *Sinter Kohlen* et $8^{kil},30$ pour les houilles voisines des charbons gras ordinaires. Les houilles marchandes à 10 pour 100 de cendres ne dépassent guère 7 kil. à $7^{kil},50$.

Dans les essais faits à Woolwich et à Portsmouth, les charbons de Hartley (Newcastle) ont donné 7 kil. à $7^{kil},75$; ils contenaient 5 à 8 pour 100 en poids de cendres et d'eau.

Cette puissance calorifique industrielle a été obtenue au moyen des expériences consignées au tableau suivant :

ORIGINE DES HOUILLES.	PROPORTION EN CENTIÈMES		POIDS D'EAU VAPORISÉE par kilogramme DE HOUILLE		OBSERVATIONS.	
	d'eau.	de cendres.	marchande.	pure.		
Houilles des couches supérieures de Friedrichsthal (Saarbrück)	1,00	12,70	6,31	7,73	Demi-grasse, 41,5 °/₀ de matières volatiles.	Analyses de M. Scheurer-Kestner
Houille de Soulzbach	1,63	10,46	6,61	7,76	Houilles grasses à longue flamme proprement dites du bassin de Saarbrück	
— de Duttweiler	1,75	13.25	6,79	8,25		
— de Heinitz	1,79	11,57	6,91	7,83		
— d'Altenwald	2,74	13,50	6,95	8,27		
— de Heinitz, couche Blücher	2,00	2,28	7,83	8,18	Très-peu de cendres. Analyses du docteur Brix.	
Houille de Dutweiler	1,50	1,11	7,80	8,01		

178. *Houilles grasses proprement dites*, ou charbons de forge. — Elles sont noires, d'un éclat vif, peu dures, leur structure est plus ou moins feuilletée et lamelleuse ; elles donnent une flamme moins longue, moins enfumée, douée de plus d'éclat que les deux types précédents ; elles se ramollissent complétement au feu comme la résine et le brai, et se gonflent fortement ; le menu s'agglutine en masse compacte, forme voûte dans le foyer de la forge, de là les noms de *fine-forges*, *maréchales*, qu'on leur donne ; elles donnent de bons cokes, de là les noms de charbons *collants*, calking-coal (anglais), back-kohle (allemand) ; ces trois derniers termes conviennent en général aux trois types de charbons gras ; le deuxième type sert surtout pour le gaz ; le troisième, pour la forge ; le quatrième, pour le coke, quoiqu'ils puissent servir tous les trois à chacun de ces usages.

La densité moyenne est de 1,30. Le poids du mètre cube des morceaux est de 750 à 800 kilogrammes.

A la distillation, ils fournissent :

Coke compacte et bien fondu			68 à 74
Eau ammoniacale	3 à 1	Matières volatiles.	32 à 26
Bitume	13 à 10		
Gaz	16 à 15		

La puissance calorifique de ces houilles pures est de 8800 à 9300 d'après les déterminations faites par M. Scheurer-Kestner sur les charbons de Ronchamp, Denain et Anzin.

Ces houilles sont fort abondantes en France ; elles constituent le bassin de Saint-Étienne et la partie moyenne des bassins du Nord

et du Pas-de-Calais ; elles abondent en Belgique, autour de Liége, dans la partie inférieure du bassin de Mons. On les trouve en Westphalie (bassin de la Ruhr) et dans la zone inférieure du Yorkshire et dans le pays de Galles, aux environs de Newport.

Voici quelques exemples de *houilles grasses proprement dites :*

ORIGINE DE LA HOUILLE.	COMPOSITION de la HOUILLE PURE. C	H	O et Az	MATIÈRES volatiles dans la houille pure.	NATURE ET ASPECT du COKE.	OBSERVATIONS.
Houille de Grand-Croix (Rive-de-Gier). Partie supérieure de la grande couche.....	89,04	5,23	5,73	31,5 %	Coke fondu, très-boursouflé.....	Ont servi à la fabrication du coke.
Houille de Grand-Croix (Rive-de-Gier). Partie inférieure.	89,07	4,93	6,00	30,2	Coke bien fondu, moins boursouflé.....	Analyses de M. Regnault.
Houille grasse de Newcastle.....	89,19	5,31	5,50	»	Coke bien fondu.	M. Richardson.
Houille grasse de Durham.	85,43	5,30	9,27	»	—	M. de Marsilly. Ces houilles passent déjà en partie aux charbons à courte flamme que l'on distingue dans le Nord sous le nom de charbons durs, malgré leur friabilité, parce qu'ils *durent* plus au feu que ceux à longue flamme.
Moyenne de cinq couches de Denain (près Valenciennes).....	86,79	5,54	7,67	32,8 à 35	—	
Moyenne de neuf couches du bassin de Valenciennes	87,75	5,19	7,06	26,2 à 32,3	—	
Moyenne de trois couches de Lens, Hirson et Billy-Montigny (Pas-de-Calais).	87,59	5,43	6,98	24 à 32	—	

On peut remarquer le désaccord qui se présente entre les houilles de Grand-Croix et les charbons de Valenciennes et du Pas-de-Calais, au point de vue des matières volatiles, quoique la composition élémentaire soit sensiblement la même ; ce désaccord est du même ordre que celui que nous avons déjà signalé à propos des houilles de Ronchamp et du Creusot et répond à une modification de propriété du même ordre aussi.

Les houilles grasses supposées pures vaporisent $8^{kil},75$ d'eau en moyenne, ou bien de $8^{kil},40$ à $9^{kil},20$; les houilles marchandes, contenant de 5 à 15 pour 100 d'eau et de cendres vaporisent de $7^{kil},50$ à $8^{kil},30$, dans le cas d'une bonne combustion, comme on le voit par le tableau suivant :

ORIGINE DE LA HOUILLE.	PROPORTION EN CENTIÈMES		POIDS D'EAU VAPORISÉE par kilogramme DE HOUILLE		OBSERVATIONS.
	d'eau.	de cendres	marchande.	pure.	
Houille de Ronchamp.....	0,66	12,74	7,14	8,72	M. Scheurer-Kestner.
—	1,09	16,19	7,62	9,16	
— d'Eschweiler.....	0,80	3,30	8,76	9,18	
— de la mine d'Engelsburg.....	1,40	3,25	8,31	8,72	Le docteur Brix.
Houille de la mine le Président.....	1,40	2,28	8,11	8,47	

179. *Houilles grasses à courte flamme* ou charbons à coke. — Elles ont même texture que les précédentes avec un éclat moins vif; elles sont souvent striées de bandes alternativement brillantes et ternes; leur densité varie de 1,30 à 1,35; le poids du mètre cube de morceaux est de 800 kilogrammes.

Ces charbons sont généralement friables quoiqu'on les appelle *durs* en Belgique, et nous avons dit pourquoi; ils s'enflamment difficilement, donnent une flamme peu étendue; les fragments se gonflent et collent à la distillation, mais le coke est compacte et dur; à la limite (houilles maigres), l'agglutination est très-incomplète; c'est encore ce qui arrive quand une houille très-peu grasse reste exposée à l'air; l'élément collant se modifie par oxydation lente; il faut les carboniser à l'état frais, presque au sortir de la mine.

Ces charbons donnent des cokes denses et durs; ce sont les vraies houilles pour coke.

A la distillation, ils donnent :

Coke.....			74 à 82
Eau ammoniacale.....	1 à 1	Matières volatiles.	26 à 18
Bitume.....	10 à 5		
Gaz.....	15 à 12		

Les chiffres de la 2e colonne se rapportent à des charbons demi-maigres à coke faiblement agglutiné.

Les houilles grasses à courte flamme ont la puissance calorifique la plus élevée, elle varie de 9300 à 9600; à partir de là, jusqu'aux anthracites, la chaleur de combustion s'affaiblit.

En France, on trouve ce type de houilles au Creusot, à la base du bassin de Saint-Étienne, du Gard, de Brassac, d'Ahun, du Nord; en

Belgique, autour de Charleroi ; en Angleterre, dans le pays de Galles et surtout près de Cardiff.

ORIGINE DE LA HOUILLE.	COMPOSITION de la HOUILLE PURE. C	H	O et Az	MATIÈRES volatiles dans la houille pure.	NATURE ET ASPECT du COKE.	OBSERVATIONS.
Houilles du puits Henry (Rive-de-Gier), couche bâtarde	90,53	5,05	4,42	23,7 °/₀	Fondu	M. Regnault.
Houille de Rochebelle, près Alais	90,55	4,92	4,53	22,3	Complétement fondu	—
Houille du puits Chaptal (Creusot)	88,48	4,41	7,11	19,6	—	M. Scheur.-Kestner.
Moyenne de six couches de fine-forges de Mons	88,66	4,88	6,46	22,2	Bien fondu	M. de Marsilly.
Moyennes de sept couches du Centre (Belgique), un peu moins grasses que les précédentes	89,09	4,79	6,12	19,75	—	—
Moyenne de trois couches de Charleroi	89,29	4,80	5,91	18,31	—	—

Ici, comme pour les houilles du type précédent, nous voyons se reproduire le désaccord entre la composition élémentaire et la proportion de produits volatils ; ce désaccord se manifeste surtout pour les houilles des bassins différents comme celles de Rive-de-Gier d'une part et celles du Creusot et des bassins belges d'autre part ; ces dernières donnent plus de coke et plus de chaleur.

M. Scheurer-Kestner n'a pas pu essayer en grand la houille grasse du Creusot, mais il a pris un mélange de $\frac{2}{3}$ Creusot et $\frac{1}{3}$ Ronchamp ; ce qui équivaut à peu près à la moyenne du 4e type ; il a trouvé ainsi $9^{kil},75$ en moyenne d'eau vaporisée par un kilogramme du mélange. C'est le maximum de toutes les valeurs obtenues.

Le docteur Brix a obtenu aussi le maximum à l'aide d'une houille grasse à courte flamme, celle de la mine James, à Eschweiler. Cette houille a vaporisé $8^{kil},93$ à l'état marchand et $9^{kil},25$, si on la considère sans eau ni cendres.

En Angleterre, on a obtenu aussi l'effet utile le plus considérable avec les houilles grasses à courte flamme du Pays de Galles ; les houilles marchandes à 5 ou 7 pour 100 de cendres ont vaporisé de 9 kil. à $9^{kil},50$ d'eau.

A la suite d'expériences faites à Brest, M. Delautel attribue à différents charbons les valeurs suivantes pour leur puissance calorifique : celle des charbons de Cardiff étant 1, on a :

Pour ceux d'Anzin	1,05 à 1,01
Charbons gras à courte flamme de Roche-la-Molière (Saint-Étienne)	0,95 à 0,94
Charbons gras ordinaires de la Loire	0,90
Charbons gras à longue flamme de Newcastle	0,84
Charbons gras à longue flamme de Blanzy (Monteau)	0,78
Charbon sec à longue flamme (Montceau)	0,74

180. *Houilles maigres* ou anthraciteuses. — Elles sont noires, striées, ternes, leur cohésion est faible, mais tend à croître en se rapprochant des anthracites compactes. Leur densité est 1,35 à 1,40 ; le poids du mètre cube est de 850 kilog. ; elles s'enflamment difficilement, leur flamme est courte, de peu de durée, ne donne pas de fumée ; elles décrépitent souvent, ce qui en rend l'emploi difficile.

A la distillation, elles donnent un coke peu agglutiné, et même pulvérulent (*sinterkohlen* et *sandkohlen* à courtes flammes des Allemands) ; elles peuvent être employées à l'état cru dans les hauts fourneaux.

Leur pouvoir calorifique est de 8800 à 9500 d'après M. Scheurer-Kestner.

Elles donnent 81 à 90 de coke et 18 à 10 de matières volatiles. Elles sont rares en France ; on les trouve sur la lisière du bassin de Valenciennes, dans les bassins de la Sarthe, du Roannais et de la basse Loire, et dans certaines parties des bassins du Gard et de la Creuse. En Belgique, on les trouve à Charleroi ; en Angleterre dans le district ouest du pays de Galles ; elles abondent dans l'État de Pensylvanie aux États-Unis.

Elles peuvent vaporiser $9^{kil},15$ d'eau si on les suppose à l'état pur (houille anthraciteuse du Creusot) ; à l'état marchand, avec 10 à 11 pour 100 de cendres, elles vaporisent seulement $8^{kil},12$ environ. Les essais faits en Angleterre sur les houilles maigres du pays de Galles, contenant de 5 à 6 pour 100 de cendres donnent des résultats variant de $8^{kil},50$ à $9^{kil},50$; elles brûlent mal sur la grille.

HOUILLES MAIGRES.	COMPOSITION de la HOUILLE PURE. C	H	O et Az	MATIÈRES volatiles dans la houille pure.	NATURE ET ASPECT du COKE.	OBSERVATIONS.
Houille du puits Saint-Paul (Creuzot)	90,79	4,24	4,97	15,8	Fritté	M. Scheurer-Kestner.
Houille anthraciteuse du Creusot	92,36	3,66	3,98	11,9	Pulvérulent	
Moyenne de huit couches de Charleroi	90,42	4,27	3,31	15 à 11	Fritté	M. de Marsilly.
Moyenne de cinq couches de Charleroi	91,03	3,96	5,01	13,7 à 8,3	Pulvérulent	
Roldue (Aix-la-Chapelle)	93,56	4,28	2,16	10,9	—	M. Regnault.
Moyenne	92,85	3,96	3,19	9,1	—	

181. En résumé, si l'on applique les considérations préalablement exposées, on peut donner aux cinq types dont nous venons de parler les caractères suivants qui permettront de les distinguer dans tous les cas :

TYPES DES HOUILLES.	PROPORTIONS EN CENTIÈMES du COKE.	des matières volatiles.	NATURE DU COKE.	PUISSANCE CALORIFIQUE	EAU A 0° vaporisée par kilogramme du COMBUSTIBLE pur.
Houilles sèches à longue flamme	55 à 60	45 à 40	Pulvérulent ou légèrement fritté	8000 à 8500	$6^k,70$ à $7^k,50$
Houilles grasses à longue flamme (à gaz)	60 à 68	40 à 32	Complétement agglomeré, souvent fondu, mais poreux	8500 à 8800	7 ,60 à 8 ,30
Houilles grasses proprement dites (de forge)	68 à 74	32 à 26	Fondu et plus ou moins boursouflé	8800 à 9300	8 ,40 à 9 ,20
Houilles grasses à courte flamme (à coke)	74 à 82	26 à 18	Fondu, compacte	9300 à 9600	9 ,20 à 10 ,0
Houilles maigres ou anthraciteuses	82 à 90	18 à 10	Légèrement fritté, souvent pulvérulent	8800 à 9500	9 ,00 à 9,50

Les nombres de ce tableau se rapportent à la houille pure, c'est-à-dire supposée sans eau ni cendres.

182. Les houilles réunies en grandes masses s'enflamment quelquefois spontanément. Ce phénomène se produit surtout quand les houilles sont humides et qu'elles sont menues et pyriteuses. Il provient de la transformation du sulfure de fer par l'action de l'air et de l'humidité, réaction accompagnée d'un grand développement de chaleur. On peut prévenir cet accident en disposant les masses de combustibles de manière que l'air les traverse facilement, afin

que la chaleur ne puisse pas s'y accumuler. Quand les houilles sont menues et pyriteuses, on les met à l'abri de cette combustion en les conservant dans des bassins remplis d'eau.

183. On trouve dans la *Revue universelle* de M. Cuyper (t. XXI), un travail très-intéressant sur l'altération des houilles à l'air. Ce travail rend compte d'expériences poursuivies à Tarnowitz pendant trois ans par M. Grundmann. Les charbons de trois mines différentes (tous trois charbons à gaz et à coke de Silésie de première qualité) étaient disposés en tas de $1^m,50$ de hauteur sur 7 à 8 mètres de diamètre ; de temps en temps, on retirait du charbon pour l'analyser ; on a constaté une combustion lente ; la décomposition se fait aussi activement à l'intérieur qu'à l'extérieur des tas ; l'action est plus rapide pendant les premières semaines de l'exposition à l'air, et la chaleur par suite atteint son maximum au bout de la troisième ou de la quatrième semaine. La moitié de l'oxygène est enlevée après la première quinzaine. Voici les compositions des charbons en expérience à leur sortie de la fosse :

	N° 1.	N° 2.	N° 3.
Carbone.....	76,51	78,32	81,21
Hydrogène.....	5,32	5,04	5,38
Azote.....	0,92	0,88	0,89
Oxygène.....	5,83	8,08	5,72
Soufre.....	1,08	0,66	0,77
Cendres.....	10,34	7,02	6,03

Voici maintenant les résultats obtenus après une année d'exposition à l'air :

1° Charbon menu à l'air libre :

	N° 1.	N° 2.	N° 3.
Perte absolue en poids.....	33,08	44,61	42,19
Perte en valeur comme combustible...	47,69	56,81	55,38
Perte en valeur pour gaz.....	45,51	47,95	50,29

2° Charbon en gros morceaux sans abri :

	N° 1.	N° 2.	N° 3.
Perte absolue en poids.....	10,69	6,36	3,19
Perte en valeur comme combustible...	12,59	9,04	4,66
Perte en valeur pour gaz.....	23,93	16,22	14,24

L'influence de l'humidité sur l'altération se dégage évidemment de la comparaison de ces deux séries d'observations.

M. Warrentrap de Brunswick a d'ailleurs observé que, quand

on fait passer un courant d'air privé d'acide carbonique sur du charbon humide, on constate à l'aide de la baryte, à la sortie du gaz, une production d'acide carbonique qui commence à la température ordinaire et augmente jusqu'à 140°, température à laquelle tout le carbone peut être transformé en acide carbonique.

184. A l'usine de Kattowitz le charbon employé immédiatement après l'extraction produisait 1,348 pieds cubes de gaz par tonne (?); pendant un mois ce charbon a été placé dans des caisses sous abri et une autre portion exposée à l'air libre. Le rendement du premier est descendu à 1116 et celui du second à 950 pieds cubes, la perte pour le charbon abrité était de 17,21 pour 100, et pour le charbon exposé à l'air, de 29,52 pour 100.

185. Le poids de l'hectolitre de houille varie suivant les provenances.

Houille de la mine de Labarthe.....	88^k
Houille d'Auvergne et de Blanzy.....	87
Houille de la mine de Combelle.....	86
Houille de la mine de Lataupe.....	85
Houille de la mine de Saint-Étienne.....	84
Houille de Decise.....	83
Houille de Mons.....	80
Houille du Creusot.....	79

Ces nombres doivent un peu varier avec la grosseur des morceaux, leur inégalité, la manière de mesurer, et l'humidité plus ou moins grande de la houille.

186. Lorsqu'on remplit une certaine mesure de fragments de houille ayant à peu près les mêmes dimensions, le poids de la mesure est sensiblement indépendant de la grosseur des morceaux, pourvu toutefois que leurs dimensions soient très-petites relativement à celles de la mesure. Ce fait, connu depuis longtemps, s'explique facilement de la manière suivante : Si on remplit un vase quelconque avec des sphères de même rayon très-petit relativement aux dimensions du vase, le poids des sphères est indépendant de leur rayon. En effet, supposons que le vase soit un cube ayant pour côté n fois le diamètre des sphères, il renfermera n^3 sphères, et la somme de leurs volumes sera $n^3 \frac{4}{3} \pi r^3$; mais comme $r = 1 : 2n$, le volume devient $\frac{1}{6} \pi = 0{,}523$, nombre indépendant de n; en désignant par d la densité de la matière des sphères, leur poids total serait $0{,}523d$.

Nous avons indiqué au cours de l'exposé du travail de M. Grüner

le poids du mètre cube des houilles appartenant aux différents types.

187. Les quantités de cendres que produisent les houilles dans les foyers excèdent de beaucoup celles qui sont données par les analyses chimiques, parce que ces cendres contiennent toujours une certaine quantité de coke. Le tableau suivant renforme les résultats obtenus à la fabrique de tabac de Paris : on a opéré sur plus de 600 kilog. de houille.

Quantités de cendres, scories et parcelles de coke, produites par différentes houilles à l'état de gaillettes.

Houille dite ancien Anzin.....	0,079
Houille de Newcastle (collante).....	0,071
Houille de Denain (collante).....	0,082
Houille dite nouvel Anzin (collante).....	0,057
Houille de Decise (collante).....	0,101
Houille des veines de Mathon et du Buisson..	0,095
Houille dite Flenu première qualité.....	0,095

188. Les charbons provenant de la même mine se distinguent en gros, gaillette et menu, d'après la grosseur des morceaux, et ces trois espèces se vendent à des prix différents. Les charbons menus étaient autrefois peu estimés, parce qu'on les brûlait difficilement sur grille ; on ne les employait que pour la fabrication du coke, et la préparation des briquettes (pâte de houille menue et de 1 : 15 d'argile), employées pour le chauffage domestique. Les menus de houilles sèches étaient presque sans usage et par conséquent sans valeur. Pour toutes les espèces de houilles, les quantités de menu dont on ne trouvait pas l'emploi formaient des masses énormes qui encombraient les lieux d'exploitation. Mais depuis un certain nombre d'années, cet état de choses a bien changé ; on est parvenu, par différents procédés, à agglomérer ces menus, à en former des blocs rectangulaires qui se comportent sur les grilles comme la houille en gros morceaux, et qui, par leurs formes, peuvent se disposer de manière à présenter, sous le même volume, un plus grand poids que la houille dans son état ordinaire, circonstance très-avantageuse pour les navires à vapeur. Cette agglomération s'effectue de plusieurs manières : 1° On mêle la houille menue à chaud avec une certaine quantité de brai sec ou de brai gras provenant de la distillation de la houille ou des usines à gaz, et le mélange est ensuite introduit dans des moules et soumis à une forte compression ; ces blocs refroidis ont une grande dureté et ne se détériorent pas à l'air. Ce mode d'opération est applicable à des mélanges dans lesquels il entre une très-forte proportion

de houilles maigres; on peut même introduire les menus d'anthracite dans les agglomérés. 2° Quand les menus appartiennent à peu près exclusivement à des houilles grasses, on en remplit des moules en fonte, fermés de manière à ne permettre que l'écoulement des gaz; ces moules sont placés dans un fourneau chauffé à peu près à 500°, pendant un temps qui peut varier d'une demi-heure à trois heures, suivant la qualité de la houille. Par l'action de la chaleur, la houille éprouve une espèce de fusion pâteuse, elle tend à se gonfler, et la résistance des moules la comprime fortement. Ces procédés d'agglomération s'exécutent maintenant dans presque tous les lieux d'exploitation et sur une immense échelle.

189. La puissance calorifique des agglomérés dépendra en général de celle de la houille qui a servi à les obtenir; on pourra prendre pour base du calcul la puissance calorifique de cette dernière, en tenant compte de la quantité d'eau et de cendres que contient le combustible. Cette dernière pourra être très-variable suivant la propriété des menus employés et par conséquent pourra modifier très-notablement la valeur du combustible. Nous verrons à la fin de ce chapitre comment devra se calculer la puissance calorifique d'un combustible donné, quand on connaîtra la proportion d'eau et de cendres qu'il contient.

190. La détermination de la quantité d'eau et de cendres que contient une houille est très-importante; dans certains cas, cette quantité peut s'élever d'une façon tout à fait imprévue; dans des houilles très-sèches du bassin de l'Allier, M. Hudelo a observé des proportions d'eau extrêmement considérables et qui se sont élevées jusqu'à 16 pour 100; la houille constituait alors une substance très-hygrométrique, et rien dans l'aspect extérieur de cette houille ne pouvait servir à déceler cette propriété. La houille qui contenait 16 pour 100 d'eau ayant été d'abord desséchée, puis placée dans de l'air saturé de vapeur, reprenait une quantité d'eau qui était les 22 centièmes du poids total. Cette houille contenait 16 pour 100 de cendres.

191. *Anthracite.* — L'anthracite est un combustible qui a l'apparence de la houille, mais il est plus brillant et ne tache pas les doigts; il est très-difficile à brûler, ou du moins il ne brûle qu'à une température élevée. Il en existe des mines puissantes dans les États-Unis d'Amérique et dans le pays de Galles. En France les gîtes de véritables anthracites sont tout à fait secondaires tant par leur étendue que par la qualité de leurs produits.

192. Dans la *Revue d'architecture et des travaux publics* de 1840, M. Michel Chevalier avait attiré l'attention publique sur les puissants

gîtes d'anthracite, qui existent aux États-Unis, dans l'État de Pensylvanie, et sur les usages tant domestiques qu'industriels auxquels ce combustible était déjà appliqué.

193. Dans l'ouvrage de M. Darwin Rogers, intitulé *The Geology, of Pensylvania* et publié en 1858, on trouve, sur la constitution géologique de ces gisements et sur leur exploitation, des documents précieux que complètent les renseignements pris récemment sur place (en 1874) par M. E. Sauvage (*Annales des mines*, t. VII, 7e série).

De 1820 à 1830, l'extraction de l'anthracite a été peu importante; en 1840 elle approchait de 1 million de tonnes; elle dépassait 8 millions en 1860; elle atteignait 15,850,000 tonnes en 1870 et en 1873 elle parvenait à 19,500,000 tonnes. En cette dernière année, la production totale des États-Unis en combustibles minéraux était de 45,850,000 tonnes dont près de moitié, par conséquent, était de l'anthracite; en 1873, la production totale de la France en combustibles n'était que de 17,500,000 tonnes.

L'anthracite de Pensylvanie est un charbon dur, noir et lustré, avec un reflet bronzé, à cassure conchoïdale; sa densité varie de 1,40 à 1,60, elle atteint quelquefois 1,80 tandis que celle des houilles, comme nous l'avons vu, varie de 1,20 à 1,35.

M. Rogers distingue deux espèces d'anthracite : 1° l'anthracite proprement dit, dont la composition moyenne est la suivante :

Carbone.....	90 à 94 pour 100
Hydrogène.....	1 à 3
Oxygène et azote.....	1 à 3
Eau.....	1 à 2
Cendres.....	3 à 4

2° Le demi-anthracite, contenant en moyenne 84 pour 100 de carbone, 7,5 pour 100 de matières volatiles, 2,5 d'eau et 6 de cendres.

194. L'anthracite est employé sur une grande échelle pour le chauffage domestique, à l'aide de cheminées ou de poêles, pour les chaudières à vapeur, les bateaux à vapeur et les locomotives. Quand on le brûle sur des grilles avec tirage naturel, on en consomme au plus 65 kilogrammes, et d'ordinaire 50 kilogrammes par mètre carré et par heure; les barreaux de grille sont espacés de quelques millimètres seulement, et la couche de combustible chargé est très-faible. Ce combustible brûle sans aucune fumée apparente.

A l'exemple de ce qui s'est fait dans le pays de Galles, où l'anthracite alimente des hauts fourneaux, on emploie aussi ce com-

bustible à cet usage aux États-Unis. En 1872, sur les 636 hauts fourneaux existant dans ce pays, il y en avait 202 marchant à l'anthracite ; leur production s'est élevée à 1,257,000 tonnes de fonte, alors que la production totale était de 2,560,000 tonnes aux États-Unis.

En Pensylvanie, on se sert également de l'anthracite pour les cubilots et pour les fours à puddler, que l'on souffle alors sous la grille au moyen d'un ventilateur. L'anthracite, employé pour les hauts fourneaux et les cubilots, est celui qui reste sur une grille de criblage dont les barreaux sont écartés de 102 millimètres. Pour les fours à puddler, on prend le même charbon mêlé à celui qui reste sur une grille à trous carrés de 70 millimètres environ.

Malgré sa dureté, cet anthracite produit beaucoup de fines et de menus, à raison du mode d'extraction et des manipulations subséquentes ; ce menu, inemployé jusqu'en ces derniers temps, sert maintenant à fabriquer des agglomérés, principalement pour le chauffage domestique.

195. On rencontre l'anthracite en France dans le département de la Mayenne et dans la Sarthe, près de Sablé, ce sont des gîtes qui s'épuisent ; on en trouve dans l'Isère, à la Mure, en couches puissantes. Ce charbon ne sert qu'à la fabrication de la chaux, au chauffage domestique et à quelques chauffages industriels.

196. Voici la composition de quelques anthracites :

PROVENANCE.	COMPOSITION DU COMBUSTIBLE.					OBSERVATIONS.
	C	H	O	Az	Cendres.	
Sablé (Sarthe).....	87,22	2,49	1,08	2,31	6,90	Analyses de M. Jacquelain.
Vizille (Isère).....	94,09	1,85	0,31	1,85	1,90	
Autre anthracite de l'Isère..	94,00	1,49	0,03	0,58	4,00	
Swansea (Angleterre).....	90,58	3,60	3,84	0,29	1,72	
Pays de Galles du Sud, près Swansea.....	92,56	3,33	2,53	»	1,58	Extraits de l'ouvrage de M. Percy.
Pays de Galles du Sud.....	90,39	3,28	2,97	0,93	1,61	
Pensylvanie, Posttvill.....	90,45	2,43	2,45	»	4,67	
— Letrigh-Summit.	92,59	2,63	1,61	0,92	2,25	
— Mauch-Chunk....	84,98	2,45	1,15	1,22	10,20	

197. La détermination de la puissance calorifique n'a été faite par MM. Scheurer-Kestner et Meunier que sur une seule espèce d'anthracite, l'anthracite de Grouchewski, du bassin de Donetz, en Russie ; cet anthracite est noir-gris, d'aspect métallique, très-brillant, très-dur et très-compacte ; sa cassure présente des arêtes vives, et pen-

dant la combustion, les morceaux conservent longtemps leur forme. Il brûle sans flamme comme le coke et ne décrépite pas.

La puissance calorifique du charbon pur a été trouvée égale à 8259 ; le calcul, par la règle de Dulong, donne 8176. On voit que les deux valeurs diffèrent très-peu et qu'on pourra, en général, prendre pour puissance calorifique des anthracites, la valeur que fournit le calcul, sauf à l'augmenter de quelques centaines de calories, si la quantité d'oxygène ou celle d'hydrogène dépasse 2 centièmes. On peut admettre que la puissance calorifique de l'anthracite pur peut varier de 8200 à 8800.

198. En résumé, les valeurs moyennes qu'on pourra prendre pour puissance calorifique des combustibles minéraux, supposés purs, sont les suivantes :

Bois fossile.....	6400
Lignite proprement dit.....	7100
Lignite bitumineux.....	7900
Houille sèche à longue flamme....	8200
Houille grasse à longue flamme...	8700
Houille grasse proprement dite....	9100
Houille grasse à courte flamme...	9400
Houille maigre ou anthraciteuse...	9100
Anthracite.....	8500

199. Il ne faut pas oublier que, suivant la provenance du combustible ou suivant que ce combustible se rapprochera plus ou moins d'un type voisin de celui auquel il appartient, la puissance calorifique pourra varier en plus ou en moins de 300 à 400 calories.

200. Pour obtenir la puissance calorifique vraie d'un combustible appartenant à l'un de ces types, il faudra d'abord déterminer la quantité d'eau et de cendres que contient ce combustible ; une distillation en vase clos donnera, par le poids du coke obtenu, un caractère qui, joint aux apparences physiques du combustible, permettra d'en déterminer exactement le type.

Soit a la quantité d'eau en centièmes ;

b la quantité de cendres en centièmes ;

P la puissance calorifique qui convient au combustible pur du type déterminé ;

P_1 la puissance calorifique vraie du combustible.

On aura :

$$P_1 = (1 - a - b)\,P ;$$

la valeur ainsi trouvée suppose que l'eau formée dans la combus-

tion se condense par le refroidissement des gaz. S'il en était autrement, il faudrait retrancher de cette quantité la chaleur latente de l'eau formée, et si h est le poids moyen de l'hydrogène renfermé dans le combustible pur, on aura

$$P_1 = (1 - a - b)\,P - (a + 9h)\,606{,}5.$$

201. Voici, d'après M. Victor Bouhy, directeur général de la Nouvelle-Montagne, la quantité de combustibles minéraux extraits dans tous les pays de production, en 1872 (*Revue universelle* de Cuyper, 1875) :

Europe	Angleterre	131640000	tonnes.
	Zollverein	33306000	Plus 9108000 tonnes de lignite.
	Belgique	15659000	
	France	15204000	Plus 350000 tonnes de lignite.
	Autriche-Hongrie	4765000	Plus 5679000 tonnes de lignite.
	Espagne	730000	Plus 50000 tonnes de lignite.
	Russie et Pologne	1070000	Dont 332000 tonnes d'anthracite et 28000 tonnes de lignite.
	Italie	2000	Tout anthracite, plus 95000 tonnes de lignite.
	Pays-Bas	45000	
	Suède	35000	
	Danemark	18000	
	Portugal	21000	Presque tout anthracite, plus 4 à 5000 tonnes de lignite.
	Suisse	4000	
Amérique	États-Unis	42794000	Dont près de moitié est de l'anthracite.
	Nouvelle-Écosse, Chili et Colombie anglaise	810000	
Australie	Nouvelle-Galles du Sud	1300000	
	Queen'sland et Nouvelle-Zélande	47000	
Asie	Indes	650000	Charbon de médiocre qualité.
	Japon, Bornéo et Chine	44000	

CHAPITRE IX

Du coke.

202. Le coke est le charbon particulier que produit la carbonisation ou la distilation de la houille. Il renferme toutes les matières inorganiques fixes que contenait la houille dont il provient ; de plus, il retient encore, en proportions plus ou moins faibles, suivant la nature des houilles et la conduite de la carbonisation, de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote. D'après M. de Marsilly, du coke provenant de la carbonisation de la houille grasse de Mons, opérée en fours à sole chauffée, avait la composition suivante :

	C	H	O et Az.	Cendres.
Coke n° 1.....	91,30	0,33	2,17	6,20
Coke n° 2..:.....	91,59	0,47	2,05	5,89

Les deux échantillons analysés avaient été préalablement desséchés à la température de 200°.

203. La quantité de cendres que renferme le coke est variable non-seulement avec la nature, mais encore avec la grosseur du charbon employé à la carbonisation : cela tient à ce que les fines contiennent toujours plus de cendres que la gaillette. Voici les résultats fournis par M. de Marsilly relativement aux cendres de différents cokes obtenus en grand, au moyen de charbon de l'Agrappe (bassin de Mons) :

1° Fosse n° 5, chaufournière :

	Cendres.
Coke du gros.....	5,00
— du gailletin.....	8,00
— du tout-venant.....	9,75
— du fin criblé.....	11,50

2° Fosse n° 12, Grande-Séreuse :

	Cendres.
Coke du gros.....	4,50
—	5,50
Coke du gailletin.....	6,50
—	11,50
Coke du fin.....	12,00
—	17,00

Les faibles teneurs en cendres exigées par les compagnies de chemins de fer (5 à 6 pour 100) sont fort désirables ; mais dans la pratique industrielle on est forcé d'être moins exigeant : ainsi, même pour les hauts fourneaux, les cokes à 10 et 12 pour 100 de cendres sont acceptés ; et quand parfois on est obligé à plus de tolérance encore, on a soin de régler le lit de fusion en conséquence. Quoi qu'il en soit, il est clair qu'au point de vue de la qualité des produits fabriqués, aussi bien qu'à celui de l'effet calorifique, la valeur des cokes est d'autant plus grande que la teneur en cendres est plus faible.

204. Le coke renferme constamment une certaine quantité d'eau.

D'après les essais qu'a faits M. de Marsilly, et qui avaient pour objet l'examen des conditions à imposer aux fournisseurs du chemin de fer du Nord, le coke ne devrait pas contenir plus de 2 à 3 pour 100 d'eau ; cependant il a constaté que la proportion d'eau peut s'élever à 5 ou 6 pour 100 et même au delà. Il convient de remarquer qu'on éteint généralement le coke à la sortie des fours par une aspersion d'eau en plus ou moins grande abondance ; cet arrosage favorise le départ d'une partie du soufre que contient le coke à l'état de sulfure de fer.

Le même auteur a observé que du coke parfaitement sec ne reprend que 1 à 2,5 pour 100 d'eau à l'air humide ; le coke desséché à 150° ou 200°, puis immergé dans l'eau pendant vingt-quatre heures, peut absorber 51 pour 100 d'eau, chiffre le plus fort qui ait été observé ; la moyenne est de 36 pour 100 d'eau absorbée.

Il suit de là que, suivant les climats et la durée de la mauvaise saison, et quand on sera obligé par les circonstances à faire des approvisionnements de coke, il pourra n'être pas inutile de le mettre en halle, ou tout au moins de le disposer en tas protégés contre l'humidité du sol et contre la pluie.

205. Les compagnies de chemins de fer imposent à leurs fournisseurs la condition que le coke soit pur, sec, d'une dureté suffisante, contenant au plus 5 à 8 pour 100 de cendres et 1 1/2 à 2 pour 100 d'eau (cette teneur variant suivant les exigences des compagnies), et qu'enfin le coke soit en gros ou moyens morceaux dont les plus petits ne doivent pas passer à travers une grille non quadrillée, à barreaux ronds espacés de 4 centimètres.

La carbonisation du coke pour les chemins de fer a beaucoup diminué depuis que les compagnies peuvent employer de la houille et des briquettes d'agglomérés dans des foyers imparfaitement fumivores.

La houille et les agglomérés forment actuellement plus des deux tiers du combustible employé pour les chemins de fer.

206. Les caractères extérieurs du coke sont variables ; il peut être compacte et assez pesant, poreux et léger, terne et noir, ou gris clair avec une sorte d'éclat argentin. Le coke brûle presque sans flamme et il ne peut se maintenir en ignition qu'autant qu'il est en volume un peu considérable dans un foyer. Sa combustibilité varie avec sa constitution physique ; aussi, tel coke convient-il dans des circonstances où un autre serait d'un emploi mauvais ou désavantageux ; par exemple, le coke des cornues à gaz, poreux et léger, est recherché

pour le chauffage domestique et même pour certaines opérations industrielles, telles que le réchauffage des aciers destinés à la trempe. La combustibilité du coke est toujours faible relativement à celle des autres combustibles usuels.

207. La qualité du coke dépend de la nature de la houille employée à sa fabrication, du mode de carbonisation et de la durée de celle-ci. On a reconnu depuis longtemps que plus la température a été élevée et plus la durée de la carbonisation a été longue, plus aussi la dureté du coke est grande et sa combustibilité faible.

Dans ses expériences sur la carbonisation du bois, M. Violette a vu que le charbon de bois est d'autant moins facilement combustible qu'il a subi une température plus élevée ; on voit qu'il en est de même du coke ; il n'est pas douteux qu'il n'en soit de même pour tous les charbons.

208. Le mètre cube de coke pèse de 400 à 450 kilogr. ; pour certaines houilles riches en matières volatiles, ce poids descend à 360 kilogr. ; le mètre cube de coke des cornues à gaz pèse au plus 300 kilogr.

209. Toutes les houilles ne sont pas propres à donner du coke ; il y en a qui ne fournissent qu'une matière frittée et pulvérulente ; c'est le cas des houilles sèches et des houilles maigres ; les seules houilles qui puissent convenir à cette fabrication sont celles qui appartiennent aux trois types compris sous le nom de houilles grasses ; la proportion dans laquelle l'oxygène et l'azote, pris en somme, doivent y entrer est comprise entre 12 à 14 pour 100 d'une part, et 4,5 pour 100 d'autre part ; mais les houilles qui conviennent tout spécialement à la fabrication du coke sont les houilles grasses à courte flamme du quatrième type dont nous avons donné plus haut les propriétés (n° 181). C'est à celles-ci qu'on s'est uniquement adressé lors de l'introduction du coke dans la métallurgie ; mais, depuis une vingtaine d'années, l'accroissement des besoins a fait songer à utiliser les houilles demi-grasses et les houilles maigres en opérant le mélange de ces sortes diverses, et en même temps à employer, pour la fabrication du coke, les menus négligés jusque-là.

Nous avons fait observer dans l'étude des houilles à coke qu'il est souvent avantageux de carboniser les houilles demi-grasses lorsqu'elles sortent de la fosse, l'altération de ces houilles à l'air pouvant modifier complétement la nature du coke qu'elles fournissent.

210. La quantité des matières inorganiques peut varier, comme nous l'avons dit plus haut, suivant qu'on considère le gros ou le

menu; dans les houilles ordinaires, il y a de 0,03 à 0,06 de cendres dans le gros, et de 0,06 à 0,15 dans le menu; les houilles les plus impures, parmi celles que l'on exploite, laissent jusqu'à 0,20 de cendres.

Les houilles à coke contiennent de 3 à 8 pour 100; cependant on peut, en les soumettant à un lavage préalable, se servir, pour la fabrication du coke, de houilles moins pures.

La houille peut être carbonisée à l'air libre, dans des fours ou dans des cornues (gaz d'éclairage).

211. *Carbonisation à l'air libre.* — Ce procédé, qui a été le plus anciennement employé, a consisté d'abord dans la carbonisation en meules circulaires analogues à celles qu'on emploie pour la carbonisation du bois; il s'applique à la houille en fragments assez gros. C'est donc la carbonisation produite par la combustion partielle du combustible lui-même.

212. La meule doit s'établir sur une aire sèche et bien nivelée, et en un lieu où il soit possible d'avoir de l'eau. Les meules ont des dimensions fort variables, tantôt 5 à 6 mètres de diamètre à la base, tantôt 9 à 10, avec $1^m,50$ et $1^m,80$ de hauteur au centre. Les plus grandes contiennent jusqu'à 20 tonnes de houille; au centre, on construit une cheminée à claire-voie qui s'étend un peu au-dessus de la meule. On range du gros charbon tout autour de la cheminée; la première couche sur l'aire est également en gros charbon. On achève la meule avec des morceaux plus petits et on couvre la surface comme dans les meules à charbon de bois. On allume la meule en jetant dans la cheminée quelques charbons enflammés; le feu prend au bas de la masse, et gagne la surface extérieure; au fur et à mesure qu'il monte, le charbonnier en suit et en règle la marche en recouvrant de poussier de coke mouillé les parties où le feu est trop actif. La carbonisation est terminée lorsque, toute la masse étant incandescente, il n'en sort plus de fumée et que la cheminée ne laisse échapper qu'une flamme courte et blanche. On procède à l'extraction en bouchant la cheminée et en tassant du poussier de coke mouillé sur la surface. Quelques jours après, on étale le coke sur le sol pour en activer le refroidissement et on l'arrose avec de l'eau. Dans les grosses meules, la carbonisation dure de six à sept jours.

213. On applique encore la même manière d'opérer à des meules allongées en forme de demi-cylindres ayant $2^m,50$ à $3^m,50$ de largeur à la base et $1^m,20$ à $1^m,50$ de hauteur dans l'axe. Elles peuvent être d'une longueur quelconque : elles contiennent 2000 à 3000 ki-

logrammes de houille par mètre courant. On a employé autrefois le procédé des tas allongés dans le bassin de la Loire, pour la carbonisation des houilles menues.

214. On a aussi constitué en Silésie, et imité dans plusieurs districts de l'Allemagne, des tas allongés au moyen de deux murs parallèles entre lesquels se place la houille à carboniser; on recouvre celle-ci d'une couche de poussier de houille, de coke ou de terre argileuse. L'opération était plus facile à conduire, grâce aux entrées d'air ménagées dans les murs latéraux, lesquelles correspondaient à des canaux réservés dans la houille elle-même. On réduisait ainsi en coke les houilles menues, convenablement tassées entre ces murs.

215. Toutes ces variantes de la carbonisation à l'air libre causent une perte notable de houille. Leur rendement moyen en coke dépasse rarement 50 pour 100, et cela avec des houilles qui, traitées même dans les anciens fours à coke, rendraient 65 à 67 pour 100; mais il existait un préjugé en faveur de la carbonisation à l'air libre, en Angleterre principalement. On peut dire qu'aujourd'hui la carbonisation à l'air libre est généralement abandonnée sur le continent, où l'on trouve les fours à coke les plus perfectionnés; ces fours y ont tous d'ailleurs pris naissance; en Angleterre, la carbonisation à l'air libre est encore fréquemment employée.

216. *Carbonisation en fours.* — Dans les fours les plus anciens, et dans ceux qui sont encore les plus répandus, la carbonisation s'opère aussi par la combustion partielle de la houille; mais on tend de plus en plus à s'affranchir de la perte qui en résulte et à opérer presque complétement par distillation, en employant à cet effet la combustion des gaz produits pour le chauffage des parois elles-mêmes du four. de rendement se trouve ainsi considérablement accru, et on peut dire qu'avec les nouveaux fours on obtient en coke le même rendement que dans le laboratoire, à 3 ou 5 pour 100 près.

217. Le plus ancien des fours à coke, dit four de boulanger, est à sole circulaire ou elliptique, avec une seule porte, et une seule cheminée au centre de la voûte qui le recouvre; le chargement en est long, et le déchargement, qui ne saurait se faire qu'au crochet, est également lent; il est en outre pénible pour les ouvriers et cause beaucoup de déchet. On a fait également des fours à sole rectangulaire, allongée, avec deux ou trois cheminées et une seule porte. Ces fours présentent les mêmes inconvénients que les précédents. On a tenté de défourner ces derniers mécaniquement, au

moyen d'un bouclier qui reste dans le four pendant la carbonisation; mais ce moyen est défectueux. Enfin, on a eu les fours à deux portes situées aux deux extrémités d'un four à sole rectangulaire de 4, 5 et 6 mètres de longueur. On en a opéré mécaniquement le déchargement à l'aide d'un repoussoir, que l'on introduit par l'une des portes, qui chasse devant lui le bloc de coke et le fait sortir par l'autre porte. Dans tous ces fours, il y a introduction d'air par des ouvreaux spéciaux pour allumer le feu; puis, lorsque la carbonisation est commencée, l'air s'introduit par d'autres orifices, au-dessus de la masse de houille, dans les gaz produits et qui remplissent la capacité restée vide dans le four au-dessus de la houille. Les gaz sont ainsi en grande partie brûlés et la carbonisation s'opère dans la masse de haut en bas. Ces fours ont une assez grande largeur, car on n'y entasse la houille sur leur sole qu'à une faible hauteur : $0^m,40$ à $0^m,45$ environ.

218. La carbonisation dure généralement vingt-quatre heures, quelquefois trente-six et même quarante-huit heures; la charge est le plus souvent de 2500 à 3000 kilogr. quelquefois de 4000 ou de 5000 kilogr. Dans les fours de Seraing, à sole rectangulaire et à deux portes dont Ebelmen a, en 1850, analysé les gaz produits pendant les diverses périodes de la carbonisation, la charge était de 3 mètres cubes ou 2750 kilogr. de houille (*Annales des Mines*, 4e série, tome XIX). La carbonisation durait vingt-quatre heures, y compris le chargement. D'après les analyses de gaz exécutées par cet habile chimiste, la quantité d'air introduite dans les fours pour la carbonisation s'élevait à $2^{mc},90$ par kilogramme de houille chargée. C'est plus du tiers de la quantité qui aurait suffi pour brûler complétement cette houille. Le rendement des houilles que l'on carbonisait à Seraing était de 1,60 en volume et de 0,67 en poids. L'analyse immédiate de la houille employée a donné pour résultat :

Coke.	Carbone.....	78,00
	Cendres.....	2,00
Matières volatiles.....		20,00
		100,00

Ces houilles appartiennent à la catégorie des houilles grasses à courte flamme, elles donnent un coke peu boursouflé, excellent pour les hauts fourneaux; il est fâcheux au point de vue de l'étude des résultats obtenus que l'analyse élémentaire de cette houille n'ait pas été faite.

219. Les gaz qui sortent des fours à coke sont composés ainsi qu'il suit :

	Après 2 heures.	Après 7 heures.	Après 14 heures.	Moyennes en volumes.	Moyennes en poids.
Acide carbonique.....	10,13	9,6	13,06	10,93	16,86
Hydrogène protocarboné.	1,44	1,66	0,40	1,17	0,65
Hydrogène.....	6,28	3,67	1,10	3,68	0,24
Oxyde de carbone.....	4,17	3,91	2,19	3,42	3,28
Azote.....	77,98	81,46	83,25	80,80	78,97
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Les gaz ne renferment point d'oxygène libre. Le rendement en coke étant de 67, il est en carbone de 67 — 1,41 = 65,59 ; ainsi, la perte totale de matières combustibles est de 89,27 — 65,59 = 23,68 de carbone et de 4,85 d'hydrogène. Dans cette perte de matières combustibles, le carbone est à l'hydrogène dans le rapport de 23,68 à 4,85, ou dans celui de 1 à 0,205 ; tandis que dans les gaz le carbone est à l'hydrogène dans le rapport de 1 à 0,64 ; ainsi, plus des 2/3 de l'hydrogène de la houille sont brûlés pendant la carbonisation. Ce fait résulte aussi de ce que dans les gaz la quantité d'oxygène n'est que les 15 centièmes de celle de l'azote ; tandis qu'il en serait les 26 centièmes, si aucune partie d'oxygène n'avait disparu en formant de l'eau.

L'acide carbonique renfermant 0,27 de carbone, l'hydrogène proto-carboné 0,75, et l'oxyde de carbone 0,43, il s'ensuit que les gaz contiennent 16,86.0,27 + 0,65.0,75 + 3,28.0,43 = 6,45 de carbone, pour 78,97 d'azote. Or, comme 100 kil. de houille perdent par la distillation $23^{kil},68$ de carbone par leur transformation en coke, il s'ensuit que la quantité d'azote correspondante est égale à 78,97.23,68:6,45 = 290 kil., et comme l'azote renfermé dans un mètre cube d'air atmosphérique pèse à très-peu près 1 kilogr., il s'ensuit que pendant la carbonisation on a introduit à peu près $2^{m},90$ d'air dans les fours par kil. de houille, comme nous l'avons dit plus haut.

En admettant que dans la houille employée la proportion d'azote soit de 1,47, celles de l'oxygène et de l'hydrogène seraient 4 et 4,85 ; et les matières combustibles de la houille seraient 89,27 de carbone et 4,35 d'hydrogène libre ; alors la puissance calorifique de cette houille serait 0,8927.8080 + 0,0435.34462 = 8712, et la quantité de chaleur perdue 0,2368.8080 + 0,0435.34462 = 3405, à peu près 0,40 de la puissance calorifique théorique.

La chaleur, qui serait produite par la combustion des gaz non brûlés, s'obtiendra facilement en remarquant que pour chaque kilogr. de houille le poids de l'azote introduit est de $2^{kil},90$; alors les poids des gaz combustibles correspondants à chaque kilogr. de houille seront ceux que nous avons indiqués dans le tableau précédent multipliés par le rapport de 2,90 à 0,79, ou par 3,67. Ainsi, cette quantité de chaleur sera, pour l'hydrogène proto-carboné $0,0065.3,67.13063 = 311$; pour l'hydrogène $0,0024.3,67.34462 = 303$; et pour l'oxyde de carbone $0,0328.3,67.2403 = 528$; en tout 1142.

La chaleur spécifique du coke étant 0,20, la chaleur renfermée dans le coke incandescent, supposé à 1000°, serait égale à $1000.0,20 = 200$. Ainsi, abstraction faite de la chaleur perdue par la surface extérieure du four, la quantité de chaleur dont on pourrait disposer serait de 3200, dont à peu près 1/3 devrait provenir de la combustion des gaz.

Il faut cependant remarquer que, pratiquement, la perte est moindre en ce que la chaleur latente de l'eau produite dans la combustion n'est presque jamais utilisée; il faudrait alors retrancher de 3200 le produit de $39 \times 606,5 = 236$ calories, ce qui réduirait le nombre des calories utilisables à $3200 - 236 = 2964$.

220. On avait monté sur le groupe de huit fours soumis à l'essai et carbonisant chacun 2750 kilogr. de houille par vingt-quatre heures, une longue chaudière horizontale de 80 chevaux, qui recevait les flammes de chaque four en même temps qu'un filet d'air neuf. D'après un essai direct, la chaleur perdue d'un four vaporisait 146 kilogr. d'eau par heure : il ne paraît pas qu'on ait tenu compte de l'eau entraînée par la vapeur. Avec une machine consommant 20 kilogr. de vapeur par heure et par cheval, chaque four donnerait donc une force d'environ 7 chevaux.

221. Ces résultats d'expérience mènent aux conclusions suivantes qui peuvent s'appliquer à tous les fours où l'on carbonise la houille par combustion, sans qu'il y ait chauffage de la sole ou des parois : plus des deux tiers de l'hydrogène sont brûlés pendant la carbonisation ; plus des deux tiers de la chaleur perdue par les gaz ont déjà servi à les échauffer avant leur sortie du four, et les gaz combustibles n'y étant plus qu'en très-faible proportion, ils ne brûlent que difficilement et seulement dans une enceinte à température élevée.

Dans ces fours, comme dans tous les fours à carbonisation, la quantité de gaz combustible va en diminuant du commencement à la fin de l'opération.

222. Depuis treize ou quatorze ans, ce système de four et le chauffage à chaleur perdue avait été supprimé à Seraing ; outre, en effet, qu'il ne paraît pas que ce mode d'utilisation de la chaleur soit le meilleur, il y a cet inconvénient grave que la chaudière ne peut être visitée qu'en arrêtant les fours. Cependant on a établi depuis, à Seraing, une chaudière à côté d'un groupe de fours genre *Smet*, sur le sol.

Les applications de chaudières aux fours à coke sont fort rares en Belgique ; on peut pourtant citer à l'Espérance (près Seraing) un groupe de seize fours avec chaudière sur le dos des fours.

223. *Nouveaux fours à coke.* Nous appelons ainsi les fours de divers systèmes dont la sole et les parois sont chauffées par les gaz produits. Dans les fours dont nous avons parlé précédemment, la température nécessaire à la combustion de la houille se produit dans le four lui-même par la combustion des gaz qui se dégagent et par celle d'une partie de la houille elle-même ; dans les nouveaux fours, il y a encore introduction d'air au sein du gaz rassemblé au-dessus de la houille ; mais on ménage cette introduction, et les gaz dégagés, qui ont commencé à brûler, se répandent à l'aide d'ouvreaux répartis sur la longueur du four dans des carneaux dont les parois sont celles du four lui-même. Par des admissions spéciales d'air dans ces carneaux, la combustion des gaz se complète et elle permet de chauffer fortement les parois de l'enceinte qui contient la houille à carboniser.

224. C'est sur ce principe que sont fondés les fours Léon Talabot et Appolt en France ; les fours Smet, Dutait et C^ie^ en Belgique. Tous ces fours sont horizontaux, à l'exception du four Appolt qui est vertical. Les fours belges sont à section rectangulaire en plan et en coupe verticale. Le four Talabot a sa section verticale elliptique. Tous sont à deux portes avec des ouvreaux dans les voûtes pour le prompt chargement. Le déchargement s'opère mécaniquement dans les fours horizontaux.

225. Une *patente* avait été prise en Angleterre en 1839 pour les fours à coke à parois échauffées ; l'auteur revendique le chauffage de la sole et des parois ; mais son dessin, qui figure un four de boulanger, ne donne que le chauffage de la sole, il n'est point question d'air introduit pour brûler les gaz à la sortie du four ; l'air est introduit au-dessus de la houille ; comme on le voit, les moyens pratiques de réalisation ne sont nullement indiqués par le breveté dont les essais n'ont pas réussi.

226. Les fours horizontaux dont nous avons parlé avaient, à l'ori-

gine, une assez grande largeur et une longueur de 5 à 6 mètres. On y carbonisait des menus de houille grasse ou demi-grasse; mais la haute température qui s'y produisait inutilement amena à chercher à carboniser des houilles plus ou moins maigres; plus en effet les houilles s'éloignent du type houille grasse, plus elles exigent une température élevée et des dispositions qui fassent pénétrer promptement la chaleur dans toute la masse. On a donc rétréci les fours, qui n'ont plus que $0^m,50$ et même $0^m,40$ et $0^m,45$, et on a porté leur longueur à 7 mètres, à $7^m,50$ et à 8 mètres. La houille y occupe une hauteur de 1 mètre à $1^m,20$. La charge d'un four est de 2500 kilogr. à 3000 kilogr. de houille; la carbonisation dure habituellement vingt-quatre heures et quelquefois quarante-huit heures.

227. Dans le four du genre Smet (comme dans le four Talabot), les gaz s'échappent par deux ou trois ouvertures, ménagées dans la voûte du four, et de là ils descendent le long de l'une des parois, passent sous la sole, d'où ils se rendent à deux gaînes verticales placées vers le milieu du four qui servent de cheminées et qui desservent chacune la moitié du four. Ces fours étant accolés, chaque four a ainsi une cheminée d'une faible hauteur munie d'un registre.

228. Aujourd'hui on préfère avec raison donner issue aux gaz par un grand nombre d'ouvertures placées dans une des parois, à la naissance de la voûte du four. Les gaz, à leur entrée dans le vide formé par le piédroit creux qui constitue le mur de séparation de deux fours contigus, reçoivent un filet d'air pour les brûler : ce vide est divisé en plusieurs carneaux par des cloisons horizontales dans lesquelles la flamme circule, puis passe sous la sole du four, d'où elle se rend dans un grand carneau horizontal établi sous les fours ou sur les fours pour recevoir les gaz brûlés de chaque four. Ce grand carneau aboutit à une cheminée placée à l'extrémité de la batterie; on fait les batteries de 12, 15, 30 et même 40 fours; déjà pour une batterie de 30 fours il est bon d'avoir deux cheminées, une à chaque extrémité de la batterie; ces cheminées ont de 12 à 15 mètres de hauteur.

Dans ce système, les gaz d'un four chauffent une des parois verticales de ce four et celle d'un four voisin, puis la sole du four lui-même: la seconde paroi de ce même four est chauffée par le four voisin dans lequel se reproduit la même combinaison. Quelquefois on réunit les gaz de deux fours voisins sous la sole du premier four, d'où ils passent ensuite sous la sole du second. En chargeant ces deux fours à six ou douze heures de distance l'un de l'autre, on obtient un chauffage plus uniforme.

Pour déterminer la section des carneaux et les dimensions de la cheminée, il est utile de se rendre compte du volume des gaz produits, du volume des gaz brûlés et de leur température aux différents points du parcours. En pratique on donne aux carneaux du four où les gaz circulent au moins 0,018 à 0,020 de la section de la sole.

229. Dans ces fours horizontaux à deux portes, le défournement s'opère mécaniquement par un bouclier emmanché à l'extrémité d'une crémaillère, qu'un treuil fait avancer. Tout l'appareil reste hors du four pendant la carbonisation et il n'y entre que pendant le défournement. Au lieu d'un treuil manœuvré à bras, on trouve à peu près partout un moteur à vapeur ; le système le plus commode consiste en une locomobile-défourneuse dont tout l'attirail roule sur un chemin de fer établi devant les fours, on amène la défourneuse devant le four qu'il s'agit de défourner : le défournement des fours les plus longs ne dure que cinq à six minutes.

Cette promptitude de défournement, jointe à la promptitude du chargement par plusieurs cheminées placées dans la voûte du four favorise la formation du coke des houilles mi-grasses et des mélanges de houilles maigres et de houilles grasses, car il importe que la chaleur les saisisse promptement.

230. Nous avons vu que, dans ces fours, on faisait arriver de l'air dans les gaz accumulés au-dessus de la houille, mais maintenant on supprime souvent cette admission d'air et on ne conserve que celle qui est amenée en minces filets à la sortie des gaz du four.

231. Le four vertical *Appolt* a été établi par ses auteurs à Saint-Avold en 1857. Ses parois sont également chauffées par la combustion des gaz de la distillation. Il se compose d'un certain nombre de compartiments de section rectangulaire ayant à la partie supérieure $0^m,33$ de large et $1^m,10$ de long, et à la partie inférieure $0^m,45$ de large sur $1^m,24$ de long; la hauteur est de 4 mètres environ. Le type adopté par les auteurs se compose de 18 compartiments ou cornues, contenant ensemble 24000 kilogr. de houille. Le bloc de coke étant vertical et les parois du four évasées, il doit tomber tout seul quand on enlève le tampon d'en bas ; mais, pour cela, il faut que les houilles ne soient pas trop grasses, trop boursouflantes, aussi ces fours conviennent-ils mieux aux mélanges dans lesquels il entre une forte proportion de houille maigre; néanmoins le défournement ne s'opère pas toujours sans l'intervention de la main des ouvriers. On place une cheminée à chacun des quatre points du groupe ; le tirage est ainsi facile à régler. La construction de ces fours doit être faite en briques

de forme spéciale, soigneusement appareillées, de manière à éviter les réparations fréquentes et les chômages. La plate-forme où s'exécute le chargement doit être à une assez grande hauteur au-dessus du quai de défournement. Tous les terrains ne se prêtent pas à cette disposition, et s'il faut élever la houille à toute la hauteur du four, c'est un embarras. Comme les avantages de ces fours se retrouvent dans les fours horizontaux perfectionnés, les fours Appolt ont cessé de se répandre. Il en est de même des fours Talabot, qui sont d'une construction difficile.

232. Le four Smet a reçu de M. Coppée, fabricant de coke en Belgique, des perfectionnements de construction et des dispositions qui l'ont fait adopter particulièrement en Allemagne, pendant ces dernières années, et en France, à Anzin, Denain, Blanzy et Decazeville ; ces fours sont à parois et à sole chauffées. Chacune des ouvertures placées à la naissance de la voûte pour donner issue aux gaz aboutit à une gaîne verticale qui jette le gaz enflammé sous la sole ; le four voisin évacue ses gaz de la même façon, mais ceux-ci se rendent sous la sole du premier four, et les gaz des deux fours réunis passent ensuite sous la sole du deuxième four. Les deux fours sont chargés à distance l'un de l'autre. Une cheminée commune dessert chaque batterie qui se compose ainsi de fours fonctionnant par groupes de deux.

233. Ces fours à parois chauffées ont permis d'employer à la fabrication du coke des houilles maigres et des houilles anthraciteuses en mélange avec des houilles plus ou moins grasses. Ainsi au Creuzot, on charge 55 pour 100 de menus de houille de Saint-Étienne avec 45 pour 100 de houille anthraciteuse ; à Anzin, 50 pour 100 de houille grasse et 50 pour 100 de houille maigre.

Les cokes ainsi obtenus peuvent avoir toute la pureté désirable et une teneur en cendres aussi faible que possible en prenant soin de n'employer que des houilles lavées ; aussi, quoique cela sorte un peu de notre sujet, dirons-nous plus loin quelques mots sur le lavage des houilles qui a été un fait très-important dans la question de l'utilisation des combustibles.

234. *Fours à coke et à gaz d'éclairage.* — Ce système a été inauguré en 1850 par Pauwells et Dubochet pour fournir simultanément du gaz d'éclairage et du coke métallurgique. La sole seule est chauffée par un foyer à coke et les gaz aspirés par un extracteur sont envoyés comme d'habitude aux condenseurs et aux gazomètres ; la charge des fours à la Compagnie parisienne où il y en a une cinquantaine en activité

dans son usine de la Villette est de 5000 kilogr. environ ; la distillation dure soixante-douze heures, on brûle 6 à 7 hectolitres de coke par tonne de houille distillée, le coke obtenu est employé dans les fonderies. Le rendement serait de 65 pour 100, non compris ce que l'on brûle de coke.

235. Un dispositif semblable dû à M. Knab a pour but de recueillir les goudrons et les eaux ammoniacales. Les gaz combustibles qui n'ont pas été condensés, sont ramenés au foyer où ils servent au chauffage des fours. Cette industrie s'est peu répandue, les usines à gaz fournissant les mêmes produits : On la trouve en activité à l'usine de MM. Carwès et C^ie^ près de Saint-Étienne ; à l'usine du Marais quatre-vingt-huit fours distillant par jour 150 tonnes de houille fournissaient d'après M. Gaultier de Claubry (*Bulletin de la Société d'encouragement,* 1862) :

Gros coke.....	70,00 pour 100
Menu coke.....	1,50
Débris noirs et triages.....	2,50
Graphite,.....	0,50
Goudron.....	4,00
Eaux ammoniacales.....	9,00
Gaz.....	10,58
Perte.....	1,92

236. *Coke des cornues à gaz d'éclairage.* — La distillation de la houille, pour obtenir le gaz d'éclairage, s'opère généralement dans des cornues chauffées avec du coke de l'usine même. Les cornues en fonte, anciennement employées, sont presque partout remplacées par des cornues en terre réfractaire, d'où le gaz est extrait par l'aspiration d'une machine à piston, ou autre, dite extracteur ; les produits de la condensation, dont on était si fort embarrassé autrefois, sont recherchés aujourd'hui, et se sont vendus bruts jusqu'à 50 francs les 1000 kilogrammes. Par de nouvelles distillations, on en tire des huiles, de la benzine, de l'ammoniaque, et enfin du brai qui sert à la fabrication des agglomérés.

Le coke des cornues est poreux et léger ; sa combustibilité est plus grande que celle des cokes de four. Parfois, en Angleterre, on s'en est servi dans les hauts fourneaux pour ne pas mettre hors, alors que les fournitures ordinaires de coke venaient à manquer. Aux usines de Saint-Louis, près Marseille, où l'on emploie des minerais riches et fusibles, on était parvenu, en 1860, à un roulement régulier dans un fourneau de dimensions convenables, en compo-

sant la charge des combustibles de 2/3 de coke de cornues à gaz et de 1/3 de coke de four.

237. *Emploi des chaleurs perdues des fours à coke.* — Le succès de l'utilisation des gaz des hauts fourneaux a ramené les idées vers l'utilisation de la chaleur perdue des fours à coke; toutefois, les conditions ne sont pas les mêmes dans les deux cas. Nous avons vu qu'en 1850, à Seraing, on obtenait d'une chaudière à vapeur montée sur un groupe de huit fours, une force de 7 chevaux environ par four; ce mode abandonné presque partout, à cause de ses inconvénients, s'était d'ailleurs peu répandu. Les fours à coke à parois chauffées sont venus donner une utilisation immédiate de la chaleur perdue par les gaz de la distillation; néanmoins dans une batterie de fours de ce genre bien organisée, il est possible encore d'obtenir une force d'environ 3 chevaux par four chargé, comme ceux de Seraing, de 2500 kilogr. à 3000 kilogr. de houille; à cet effet, les gaz de chaque four, après leur parcours autour des parois qu'ils chauffent, entrent dans un carneau horizontal qu'il est plus convenable d'établir sous les fours que dessus; à l'extrémité du carneau et parallèlement à la batterie, à côté de celle-ci, par conséquent, on installe la chaudière dont les carneaux reçoivent le flux gazeux qui provient de toute la batterie; la cheminée sert à volonté, au moyen de registres, au four et à la chaudière, et aux fours seuls en cas de chômage de celle-ci. Cette disposition, convenablement agencée, ne gêne aucunement le service des fours ni leur entretien; elle n'a pas de fâcheuse influence sur la préparation du coke, chaque four possédant son registre pour la régler; comme le broyage et le lavage des houilles employées pour la fabrication du coke sont des opérations destinées à se répandre, il est bon de savoir qu'on a sous la main la force motrice nécessaire pour les accomplir, même avec les nouveaux fours.

238. *Préparation et lavage des houilles.* — Nous avons vu comment l'emploi des fours perfectionnés a permis de ne plus recourir qu'aux menus pour la fabrication du coke, et, chose importante, comment il est possible de faire entrer dans la composition des charges une forte proportion de houille maigre ou de charbon anthraciteux. Dans les houillères de France et de Belgique, la proportion des menus dépasse souvent 60 pour 100, et dans le cas où les veines de charbon présentent des lamelles de schiste interposées, les menus sont fort impurs; dans ce dernier cas, le lavage est d'une nécessité absolue, si l'on veut obtenir du coke avec une faible proportion de cendres,

régulière et déterminée. Bien souvent le lavage doit être précédé du broyage; des cylindres, des meules ont été affectés à cet objet; mais le broyeur Carre perfectionné paraît être l'outil le plus simple et le moins sujet à variation dans ses effets. Il offre, en outre, cet avantage que la machine qui sert à broyer, sert aussi à bien faire le mélange des houilles de natures diverses qu'on veut carboniser : un mélange intime est en effet nécessaire pour avoir du coke homogène; le broyage présente cet avantage de donner du plus beau coke et moins de déchet ou petit coke. Le lavage des houilles s'exécute par deux méthodes différentes, fondées également sur la différence des densités de la houille et des matières étrangères qui l'accompagnent. Dans la plus ancienne, l'appareil consiste en un long canal, peu profond, à fond incliné, qui est muni, de distance en distance, de cloisons transversales, ou en une série de caisses échelonnées; on fait couler constamment de l'eau dans ce canal, à l'origine duquel on verse la houille menue; les fragments les plus lourds se déposent dans les premiers compartiments, et les plus légers, c'est-à-dire la houille, dans les derniers. Le procédé bien aménagé donne de bons résultats, mais il exige une grande quantité d'eau que l'on n'a pas toujours à peu de frais à sa disposition; aussi la méthode suivante est-elle la plus usitée.

239. Dans ce second mode, l'opération n'exige pas une grande dépense d'eau, et elle s'exécute promptement. L'appareil consiste en une caisse divisée en deux compartiments inégaux par une cloison verticale, qui ne descend pas jusqu'au fond; le plus petit contient un piston que l'on meut à bras ou par une machine à vapeur; le plus grand est recouvert par deux grilles horizontales, plus ou moins rapprochées; la première est formée de barreaux espacés de $0^m,01$ environ au plus, et la seconde d'une plaque en cuivre percée de trous d'un petit diamètre : la caisse étant remplie d'eau, on verse une certaine quantité de houille sur la première grille et on fait osciller le piston, alors l'eau monte et descend à travers la couche de houille, et amène les matières les plus lourdes sur la seconde grille. Suivant les houilles, on donne un plus ou moins grand nombre d'oscillations au piston; le genre d'appareil, dit *bac à piston*, a subi diverses modifications; il est accompagné de divers compléments réclamés par la diversité des houilles à laver; par certaines dispositions du lavoir, on parvient à laver même les fines. Nous ne pouvons que renvoyer pour une complète information à des ouvrages spéciaux.

240. Le déchet au lavage est bien différent d'une houille à une autre, ainsi que le prix de revient du lavage; celui-ci varie de 0,40 à 1 fr. par tonne; le lavage des houilles a donné naissance à l'industrie des agglomérés, qui sont maintenant employés en si grande quantité par les chemins de fer et la marine, car il a permis de produire un combustible ne contenant qu'une quantité faible et régulière de cendres, avec des matières qui étaient anciennement pour les houillères des déchets point ou mal utilisés.

Tous les cokes du commerce ne sont pas fabriqués avec des houilles lavées; ceux des houilles non lavées sont à un prix inférieur au prix des cokes de houilles lavées; il est donc à souhaiter que le lavage s'étende à tous les menus destinés à la fabrication du coke.

241. — *Puissance calorifique du coke.* — La puissance calorifique du coke n'a pas été déterminée directement; on peut admettre, sans erreur sensible, que cette puissance calorifique est égale à celle du carbone qu'il contient; en appelant a la quantité d'eau contenue dans le coke, et b la quantité de cendres exprimée en centièmes, on aura :

$$P = (1 - a - b)\ 8080$$

pour des cokes contenant 2 pour 100 d'eau et des proportions de cendres variant de 4 à 15 pour 100, la puissance calorifique varie de 7600 à 6700.

242. *Matières explosives.* — Ces substances telles que la poudre à canon, la dynamite, etc., peuvent être, à certains points de vue, considérées comme des combustibles; seulement ces combustibles brûlent sans avoir besoin de la présence de l'air extérieur, parce qu'ils contiennent, à l'état latent pour ainsi dire, l'oxygène nécessaire à la combustion des éléments combustibles qu'ils renferment.

MM. Roux et Sarreau ont déterminé les puissances calorifiques d'un certain nombre de ces substances (*Comptes rendus de l'Académie des sciences* 1873). Ils opéraient la déflagration dans des bombes cylindriques de $0^m,006$ d'épaisseur et de 270^{cm3} à 280^{cm3} de capacité fermées par un bouchon taraudé ; la bombe était traversée par un fil qui permet d'enflammer la substance explosive par le passage d'un courant électrique qui fait rougir un fil de platine fin. Ces bombes plongent dans un vase en cuivre rouge de $0^m,140$ de diamètre et de $0^m,160$ de hauteur renfermant $1^{kil},830$ d'eau. Voici les résultats obtenus :

NATURE DE LA SUBSTANCE.	COMPOSITION			CALORIES dégagées par 1 kilogramme de la SUBSTANCE.	POIDS DES GAZ fournis par 1 kilogramme de la SUBSTANCE.
	KO, AzO^5.	S	C		
Poudre de chasse fine.....	78	10	12	807,3	0k,337
— de guerre, à canon....	75	12,5	12,5	752,9	0 ,412
— à fusil, dite B.....	74	10,5	15,5	730,8	0 ,414
— de commerce extérieur.	72	13	15	694,2	0 ,446
— de mine ordinaire.....	62	20	18	570,2	0 ,499
Coton-poudre.....	«	»	»	1056,3	0 ,853
Dynamite des Vosges à 75 °/₀. .	»	»	»	1290,0	0 ,600
Mélange de 55 parties de picrate de potasse et de 45 de salpêtre.	»	»	»	916,3	0 ,485
Poids égaux de picrate de potasse et de chlorate de potasse.....	»	»	»	1180,2	0 ,466
Picrate de potasse.....	»	»	»	787,0	0 ,740

CHAPITRE X

Combustibles liquides.

243. *Huiles de pétrole.* — Ce sont des produits naturels liquides, combustibles, dont les gisements se trouvent dans les terrains stratifiés depuis les terrains tertiaires, comme dans les Carpathes, jusqu'aux plus anciens comme en Amérique.

244. On les connaissait dans le Caucase, en Perse, en Birmanie ; dans ces derniers temps, on a exploité en Amérique, au moyen de puits forés, des gisements extrêmement abondants de ces liquides ; c'est dans la Pensylvanie, la Virginie et le Canada occidental que se rencontrent les sources les plus puissantes.

Les huiles de pétrole sont de composition fort complexe. MM. Pelouse et Cahours ont extrait de la portion qui bout au-dessous de 200°, sept carbures d'hydrogène définis, appartenant à la série des carbures saturés et dont les points d'ébullition varient de 30° à 180° ; d'après M. Coignet, on n'y rencontre pas moins de 9 hydrocarbures de densité variant entre 0,626 et 0,714 et dont les points d'ébullition varient de 24° à 84°.

245. La présence de ces hydrocarbures de faible densité et très-volatils constitue une cause de dangers très-considérables ; des explosions terribles peuvent se produire par suite du mélange de leur vapeur avec l'air ; aussi dans la plupart des pays, une réglementa-

tion a-t-elle déterminé le mode de transport et d'emmagasinage de ces produits.

246. Le prix relativement élevé de ces liquides ne permet guère leur emploi comme combustibles ; ils sont jusqu'ici presque exclusivement réservés à l'éclairage, après des traitements appropriés. Cependant, dans certains cas, on a pu songer à les utiliser au chauffage à l'état brut ; M. Sainte-Claire Deville a fait à ce sujet des essais nombreux pour déterminer la composition et la puissance calorifique de ces huiles (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1868 et 1869).

247. *Huiles de houille.* — On peut rattacher aux pétroles, au point de vue des propriétés combustibles, les huiles lourdes provenant de la distillation de la houille, et produites en particulier dans la fabrication du gaz d'éclairage. Ces huiles paraissent être entrées dans la pratique de l'industrie, dans une proportion assez restreinte ; toutefois, leur emploi comme combustible peut être appelé à prendre quelque extension sans cependant qu'il puisse arriver jamais à un développement bien considérable, en raison de la quantité nécessairement limitée de leur production.

248. Nous donnons dans le tableau suivant la composition d'huiles de pétrole de différentes provenances, avec l'indication de leurs puissances calorifiques observées et calculées, ainsi que leur puissance calorifique industrielle, c'est-à-dire la quantité d'eau vaporisée que peut fournir en brûlant un kilogramme de chacune d'elles.

NATURE DE L'HUILE.	DENSITÉ A 0°.	COMPOSITION,			PUISSANCE CALORIFIQUE		EAU VAPORISÉE par un kilogramme DE L'HUILE.	
		C	H	O	observée.	calculée.	POIDS.	CALORIES dans la vapeur.
Huile lourde de la Virginie occidentale. White oak,...	0,873	83,5	13,3	3,2	10180	11192	14k,584	8960
Huile légère de la Virginie occidentale, Burning springs.....	0,841	84,3	14,1	1,6	10223	11601	14 ,553	8943
Pensylvanie, huile lourde...	0,886	84,9	13,7	1,4	10672	11514	15 ,305	9384
— huile légère...	0,816	84,0	14,8	3,2	9963	11583	14 ,052	8635
Huile lourde du gaz parisien.....	1,044	82,0	7,6	10,4	8916	8796	12 ,770	7983
Huile de schiste d'Autun....	»	79,7	11,8	8,6	9950	10131	»	»
Huile lourde de Pins.....	»	87,1	10,4	4,7	10031	10415	»	»

On voit qu'en général la puissance calorifique de ces différentes

huiles est inférieure à la puissance calorifique calculée. La différence peut s'élever (pour l'huile légère de Pensylvanie) à 1625 calories ; elle diminue quand la proportion d'oxygène augmente (huile lourde de pins et huile de schiste d'Autun); elle change de sens si cette proportion d'oxygène devient considérable, c'est le cas de l'huile lourde de la compagnie du gaz parisien.

CHAPITRE XI

Combustibles gazeux.

249. — *Puissance calorifique du gaz d'éclairage.* — Le gaz d'éclairage se rattache à la fabrication du coke; il tend à entrer de plus en plus comme combustible dans les usages domestiques et dans la petite industrie.

Le gaz d'éclairage est un mélange, pour la plus grande partie de de sa masse, de gaz combustibles ; sa densité par rapport à l'air est à très-peu près 0,4 ; c'est-à-dire qu'un mètre cube de gaz à 0° et sous la pression de $0^{m},760$ de mercure pèse $0^{kil},520$;

A Paris, la composition du gaz d'éclairage est sensiblement constante, et la même pour les différentes usines ; voici le résultat moyen d'un certain nombre d'analyses faites par M. Hudelo en 1863.

	COMPOSITION DU GAZ	
	EN VOLUME.	EN POIDS.
Azote	2,7	6,7
Oxygène	0,5	1,4
Acide carbonique	1,5	5,8
Hydrogène	50,1	8,8
Oxyde de carbone,	6,3	15,6
Gaz des marais	33,1	47,3
Gaz oléfiant	5,8	14,4
	100,0	100,0

La composition du gaz d'éclairage varie peu d'ailleurs suivant les lieux de production.

250. La puissance calorifique du gaz d'éclairage s'obtiendra en ajoutant les quantités de chaleur que peuvent produire les éléments qui le constituent ; on aura ainsi

$$P = 0{,}088 \times 34462 + 0{,}156 \times 2403 + 0{,}473 \times 13063 + 0{,}144 \times 11857 = 11293.$$

Cette valeur suppose que l'eau provenant de la combustion se condense. Si la vapeur reste dans les produits de la combustion, comme la quantité d'hydrogène qui est libre est 8,8 pour 100, celle qui entre dans le gaz des marais 9,4 et celle du gaz oléfiant 1,6, au total 19,8, ce qui donne 1,69 d'eau ; il faut retrancher $1{,}69 \times 606 = 1024$ de 11293, ce qui donne 10269.

251. Les différents combustibles solides que nous avons étudiés dans les chapitres précédents ne sont pas toujours brûlés dans leur état naturel ; dans certaines circonstances, on les transforme en gaz combustibles sous l'influence de l'air, et ces gaz sont ensuite brûlés dans des foyers disposés d'une façon particulière.

Généralement aussi, on utilise les mélanges de gaz combustibles qui se forment dans certaines opérations métallurgiques. Nous ne traiterons que plus tard, et quand nous nous occuperons des foyers, de ces modifications importantes dans l'ancien état des choses de la combustion.

252. Pour le moment, nous nous contenterons d'indiquer dans le tableau suivant, la composition et la puissance calorifique de ces produits, qui se calcule d'ailleurs comme celle du gaz d'éclairage.

NUMÉROS.	COMPOSITION										PUISSANCE CALORIFIQUE.
	EN VOLUME.					EN POIDS.					
	CO^2	CO	H	C^2H^4	Az	CO^2	CO	H	C^2H^4	Az	
I...	11,8	19,8	11,3	4,0	53,1	19,6	20,8	0,87	2,4	56,3	1013
II...	9,05	21,84	7,61	»	61,47	14,56	22,0	0,55	»	62,89	718
III...	4,2	24,2	8,2	2,2	61,2	7,03	25,89	0,62	1,33	65,13	1010
IV...	0,5	33,3	2,8	»	63,4	0,80	33,74	0,20	»	65,26	880
V...	0,73	33,54	1,47	»	64,10	1,16	33,82	0,11	»	64,91	851
VI...	11,40	24,05	4,16	1,43	58,96	17,64	23,27	0,30	0,80	57,99	767
VII...	12,24	28,22	1,38	0,33	57,83	18,30	26,42	0,09	0,18	55,01	689

Le n° I représente les résultats d'une analyse faite par M. Rinmann

sur les gaz fournis par le four Lundin alimenté à la sciure de bois, renfermant environ 50 pour 100 d'eau.

Le n° II est la moyenne de deux analyses faites par Ebelmen sur des gaz de tourbes contenant 18 pour 100 d'eau.

Le n° III est une analyse donnée par M. Krans des gaz produits dans les fours Siémens, à St-Gobain, où l'on employait trois quarts de houille grasse et un quart de houille maigre.

Le n° IV est une analyse d'Ebelmen de gaz fournis par le charbon de bois dans un gazogène à cuve, à air forcé.

Le n° V est une analyse, faite par Ebelmen, des gaz produits dans un gazogène alimenté avec du coke.

Le n° VI est la moyenne de quatre analyses faites par le docteur Bunsen et par Ebelmen sur des gaz pris au gueulard de hauts-fourneaux au charbon de bois.

Le n° VII est la moyenne de cinq analyses faites sur des gaz de hauts-fourneaux au coke.

253. Nous donnons enfin la composition des gaz d'un haut-fourneau marchant à la houille crue.

	En volume.	En poids.
Oxyde de carbone.....	25,97	28,06
Hydrogène.	6,73	0,48
Hydrogène protocarboné.....	3,75	2,18
Hydrogène bicarboné.....	0,43	0,43
Acide carbonique.....	7,77	12,45
Azote.....	55,35	56,49
	100,00	100,00

La puissance calorifique de ce gaz est 1175 calories.

CHAPITRE XII

Détermination des volumes d'air nécessaires pour brûler les différents combustibles, et des volumes de gaz qui s'échappent.

254. La détermination des dimensions des cheminées destinées à produire un effet donné, exigeant nécessairement la connaissance du volume d'air qu'elles doivent appeler par heure dans le foyer, il est indispensable de connaître le volume d'air qu'exige la combustion de 1 kilogr. des différents combustibles.

255. Les combustibles employés dans l'industrie étant tous formés de carbone et d'hydrogène, lorsqu'on connaîtra les volumes d'air nécessaires pour brûler 1 kilogr. de chacun de ces derniers corps, on trouvera facilement, d'après la composition des autres combustibles, les volumes d'air nécessaires à leur combustion.

256. En prenant l'air dans les conditions moyennes, c'est-à-dire à 15°, sous la pression de $0^m,76$ et aux trois quarts saturé de vapeur d'eau, sa composition sera :

	Volume.	Poids.
Acide carbonique.....	0,0005	0,001
Vapeur d'eau.....	0,0125	0,008
Oxygène.....	0,2050	0,228
Azote.....	0,7820	0,763
	1,0000	1,000

Les poids des différents gaz contenus dans un mètre cube de cet air seront :

Acide carbonique.....	$0^k,001$
Vapeur d'eau.....	0 ,010
Oxygène.....	0 ,278
Azote.....	0 ,925
Poids du mètre cube d'air.....	$1^k,214$

Il en résulte que le volume d'air qui contient un kilogramme d'oxygène est

$$1 : 0,278 = 3^{m3},6,$$

et que le poids de cet air est

$$3,6 \times 1,214 = 4^k,37.$$

257. *Combustion du carbone.* — Un équivalent de carbone dont le poids est 6, prend pour passer à l'état d'acide carbonique 2 équivalents d'oxygène formant un poids égal à 16 ; il en résulte qu'un kilogramme de carbone prend pour passer à l'état d'acide carbonique $\frac{16}{6}$ de kilogramme d'oxygène ; pour fournir à 1 kilogramme de carbone cette quantité d'oxygène, il faudra un volume d'air représenté par :

$$3,6 \times \frac{16}{6} = 9^{m3},6$$

ou un poids d'air égal à :

$$4{,}37 \times \frac{16}{6} = 11^{k},953.$$

258. Mais dans la plupart des foyers, surtout dans ceux des chaudières à vapeur, les volumes d'air employés à la combustion sont beaucoup plus considérables ; ils sont à peu près doubles de ceux que nous venons de calculer, car ou trouve environ 10 pour 100 d'oxygène libre dans les gaz qui sortent des cheminées. C'est un fait que j'avais constaté il y a bien des années, et qui a été vérifié depuis à Wesserling, et récemment par des expériences nombreuses faites à Paris par M. Combes, et dont je parlerai plus tard. On avait disposé les foyers de manière à satisfaire à cette condition, dans la crainte de laisser dégager trop de gaz combustibles et de former de l'oxyde de carbone. Mais, d'après les expériences faites par M. Ebelmen sur des foyers de différentes espèces de fourneaux employés dans la métallurgie du fer, il est parfaitement démontré qu'en donnant aux grilles des foyers des surfaces convenables et au combustible une épaisseur suffisante, quand la température du foyer est suffisamment élevée, tout l'oxygène de l'air peut être utilisé sans dégagement sensible de gaz combustibles. Enfin MM. Scheurer-Kestner et Meunier dans leurs expériences sur la combustion de la houille (Bulletin de la société de Mulhouse, 1869), ont trouvé que le rendement pratique maximum d'un combustible brûlant sous une chaudière à vapeur se produit quand il y a environ 0,33 d'air en excès; il faudrait donc augmenter d'un tiers les quantités précédemment calculées, et si l'on veut disposer d'un excès de tirage, on pourra prendre les 2/3 de ces quantités ; de sorte qu'en supposant seulement les 2/3 de l'oxygène employés à la combustion, le volume d'air nécessaire pour brûler un kilogramme de charbon sera :

$$9{,}6 \times \frac{3}{2} = 14^{m3},4$$

et le poids :

$$11{,}653 \times \frac{3}{2} = 17^{k},479.$$

259. Dans certains cas, la combustion du carbone est incomplète, et il passe alors à l'état d'oxyde de carbone ; la quantité d'air qu'il exige pour sa combustion est dans ce cas la moitié de celle qu'il prend pour passer à l'état d'acide carbonique.

260. — *Combustion de l'hydrogène.* — Un kilogramme d'hydrogène exige pour brûler 8 kilogrammes d'oxygène, la quantité d'air nécessaire pour brûler 1 kilogr. d'hydrogène sera donc :

1° En volume..... $3,6 \times 8 = 28^{m3},8$
2° En poids..... $4,37 \times 8 = 34^{k},96$

et si l'on suppose que les deux tiers seulement de l'oxygène soient consommés, la quantité d'air à employer sera :

1° En volume..... $28,8 \times \frac{3}{2} = 43^{m3},2$

2° En poids..... $34,96 \times \frac{3}{2} = 52^{k},34.$

261. Pour calculer la quantité d'air nécessaire à brûler 1 kilogr. d'un combustible quelconque, il suffira d'en connaître la composition élémentaire. En général, si l'on suppose l'oxygène combiné avec l'hydrogène du combustible, il se trouvera un excès d'hydrogène libre ; si nous représentons par H la quantité d'hydrogène et par O la quantité d'oxygène ; la quantité d'hydrogène libre sera $H - \frac{O}{8}$.

Cela posé, pour connaître la quantité d'air nécessaire à brûler 1 kilogramme de combustible dans des conditions données, il faudra :

1° Multiplier la fraction qui représente la quantité de charbon entrant dans le composé, par le nombre qui représente la quantité d'air (volume ou poids) nécessaire dans le cas considéré, pour brûler 1 kilogramme de charbon ;

2° Multiplier la fraction qui représente la proportion d'hydrogène libre par le nombre qui indique la quantité d'air qui sert à brûler 1 kilogramme d'hydrogène ;

3° Faire la somme de ces quantités.

262. Nous prendrons pour exemple le cas du bois moyennement sec et contenant 30 pour 100 d'eau ; sa composition est représentée par :

Carbone.....	0,350
Hydrogène.....	0,042
Oxygène et azote.....	0,294
Eau.....	0,300
Cendres.....	0,014

Dans la plupart des cas, comme dans celui qui nous occupe, on ne donne pas séparément la quantité d'azote renfermée dans le combustible. Cette quantité étant généralement très-faible, il n'y a pas

d'erreur sensible à la confondre avec l'oxygène ; partant de là, la quantité d'hydrogène libre sera :

$$0{,}042 - \frac{0{,}294}{8} = 0{,}005.$$

La quantité d'air nécessaire pour brûler 1 kilogramme de bois sera donc :

1° Quand tout l'oxygène sera consommé :

En volume..... $0{,}350 \times 9{,}600 + 0{,}005 \times 28{,}800 = 3^{m3},504$;
En poids..... $0{,}350 \times 11{,}653 + 0{,}055 \times 34{,}960 = 4^{m3},253$.

2° Quand les 2/3 de l'oxygène sont consommés :

$$\text{En volume..... } 3{,}504 \times \frac{3}{2} = 5{,}256$$

$$\text{En poids..... } 4{,}253 \times \frac{3}{2} = 6{,}379.$$

263. Les nombres que nous venons de trouver représentent les volumes d'air qui doivent être introduits dans les foyers pour brûler 1 kilogramme des différents combustibles. Cherchons maintenant les volumes de gaz qui sortent par les cheminées.

264. Si le combustible était formé de carbone pur, comme l'acide carbonique a un volume égal à celui de l'oxygène qui l'a formé, le volume d'air qui sortirait par la cheminée serait égal au volume d'air qui a pénétré dans le foyer, dilaté à la température de la cheminée.

265. Quand les combustibles renferment, outre le carbone, de l'eau toute formée ou de l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions nécessaires pour en produire, on ne peut plus regarder le volume de gaz qui se dégage comme égal au volume d'air appelé, dilaté à la température de la cheminée, car il en diffère par le volume de vapeur produite. Il en est encore de même quand les combustibles contiennent un excès d'hydrogène, attendu que le volume de vapeur auquel il donne naissance est beaucoup plus grand que le volume d'oxygène qui a servi à sa formation : ces volumes sont à peu près dans le rapport de 2 à 1, et la différence est par conséquent égale au volume d'oxygène employé.

Si t est la température des gaz de la cheminée et θ, celle de l'air extérieur, le volume, que prend dans la cheminée un mètre cube d'air introduit dans le foyer, sera :

$$\frac{1 + 0{,}00367\,t}{1 + 0{,}00367\,\theta},$$

0,00367 étant le coefficient de dilatation des gaz.

Comme 1 kilogramme d'eau produit $1^{m3},696$ de vapeur à 100° et sous la pression de 0,76; sous cette même pression et à la température t le volume sera :

$$\frac{1,696\,(1+0,00367\,t)}{1+0,00367\times 100},$$

et comme 1 kilogramme d'hydrogène produit 9 kilogrammes d'eau, le volume de vapeur produit par 1 kilogramme d'hydrogène en excès dans le combustible sera :

$$\frac{1,696\,(1+0,00367\,t).\,9}{1+0,00567\times 100},$$

et par suite l'excès de volume produit dans les gaz de la combustion, par 1 kilogramme d'hydrogène libre dans le combustible, sera :

$$\frac{1,696\,(1+0,00367\,t)\,.\,9}{231+0,00367\times 100}.$$

Nous donnons ci-dessous les valeurs calculées de ces éléments pour les deux températures de 150° et de 300°, qui répondent sensiblement : la première, au cas des cheminées des chaudières à réchauffeurs; la seconde, à celui des cheminées des chaudières ordinaires.

	A 150°	A 300°
Volume que prend un mètre cube de gaz introduit dans le foyer à 150°.....	1,470	2,000
Volume de 1 kilogramme de vapeur d'eau sous la pression de $0^{m},76$.....	1,928	2,612
Excès de volume que donne au gaz de la combustion, 1 kilogramme d'hydrogène libre...	8,68	11,76

266. Pour le carbone pur, on trouvera comme volume des gaz de la combustion :

1° Quand tout l'oxygène aura été consommé :

1° A 150°..... $9,60\times 1,470 = 14^{m3},112$
2° A 300°..... $9,60\times 2,000 = 19^{m3},200.$

2° Quand les 2/3 de l'oxygène seulement seront consommés :

1° A 150°..... $14,112\times\frac{3}{2} = 21,168$

2° A 300°..... $19,200\times\frac{3}{2} = 28,800$

267. Pour l'hydrogène libre, le volume des gaz de la combustion sera :

1° Quand tout l'oxygène aura été consommé :

1° A 150°..... $28{,}800 \times 1{,}470 + 8{,}68 = 51{,}016$
2° A 300°..... $28{,}800 \times 2{,}000 + 11{,}76 = 69{,}360.$

2° Quand les 2/3 de l'oxygène seulement seront consommés :

1° A 150°..... $43{,}200 \times 1{,}470 + 8{,}68 = 72{,}184$
2° A 300°..... $43{,}200 \times 2{,}000 + 11{,}76 = 98{,}160.$

268. Prenons comme exemple de calcul du volume des gaz produits par la combustion, celui qui se rapporte au bois contenant 30 pour 100 d'eau; ce bois contient :

Carbone.....		0,350
Hydrogène libre.....		0,005
Eau de constitution..	$\frac{0{,}294 \times 9}{8} = 0{,}333$	0,633.
Eau hygrométrique.....	$= 0{,}300$	

Le volume de gaz résultant de la combustion sera, en supposant que tout l'oxygène soit consommé dans la combustion, et que les gaz soient à 150° :

Pour le carbone.....	$0{,}350 \times 14{,}112$	$= 4^{m3},939$
Pour l'hydrogène.....	$0{,}005 \times [51{,}016 + 8.68]$	$= 0^{m3},298$
Pour l'eau.....	$0{,}633 \times 1{,}928$	$= 1^{m3},220$
Le volume cherché sera :		$6^{m3},457$

En opérant d'une façon analogue on trouverait lorsque les gaz sortent à 300°. . . . . $8^{m3},748$

Si les 2/3 de l'oxygène seulement sont consommés, les gaz sortant à 150°, leur volume sera. . $9^{m3},468$

et s'ils sortent à 300°. . . . . $12^{m3},822$

269. Il est un cas qu'il est quelquefois utile de considérer, c'est celui du carbone brûlant à l'état d'oxyde de carbone. On remarquera que l'oxyde de carbone formé présente un volume double de l'oxygène qui lui a donné naissance et que, par conséquent, ce volume obtenu présente sur celui que prendrait le volume d'air introduit, amené à la température de sortie, un excès égal au volume qu'aurait à cette même température l'oxygène consommé; pour calculer cet excès, remarquons que 1 kilogramme de carbone prend dans ces conditions

8/6 de kilogramme d'oxygène, et que par suite le volume cherché sera :

$$\frac{8}{6} \cdot \frac{(1 + 0{,}00367\,t)}{1{,}293 \times 1{,}1056},$$

on trouve ainsi pour l'excès de volume à 150°. . . . . $1^{m}{,}47$
et à 300°. . . . . $1^{m3}{,}96$

270. *Chaleur emportée par les produits de la combustion.* — Il est important de se rendre compte de la quantité de chaleur qui passe dans la cheminée après la combustion. Le calcul s'en fera facilement en multipliant le nombre qui représente la quantité en poids de chaque gaz par la capacité calorifique de ce gaz et ensuite par la différence entre la température dans la cheminée et la température ambiante; pour la vapeur d'eau, il faudra multiplier son poids par $[637 - \theta + 0{,}475\ (t - 100)]$; on fera la somme de tous les nombres obtenus.

271. *Combustion du carbone.* — Dans la combustion complète du carbone, l'oxygène consommé est remplacé par un volume égal d'acide carbonique, de sorte que le poids des gaz produits par la combustion est pour un mètre cube d'air introduit :

Acide carbonique... $0{,}0005 + 0{,}2780 \frac{1{,}529}{1{,}1056}$	$= 0^{k}{,}383$
Vapeur d'eau.....	$0^{k}{,}010$
Azote.....	$0^{k}{,}925$

Si V est le volume d'air introduit pour brûler 1 kilogramme de charbon, et si t est la température dans la cheminée, la quantité de chaleur enlevée pour 1 kilogramme de charbon brûlé sera :

$$V(t - \theta)\,[0{,}383 \times 0{,}214 + 0{,}925 \times 0{,}244) + V \cdot 0{,}010\,[637 - \theta + 0{,}475\,(t - 100)],$$

en prenant

$$V = 9^{m3}{,}600 \quad \text{et} \quad \theta = 15$$

1° Quand $t = 150°$, on trouve..... 459 calories,
2° Quand $t = 300°$, — ..... 911 —

272. S'il y avait un excès d'air dont le volume serait V', il faudrait ajouterà la quantité trouvée plus haut, la suivante :

$$V' \cdot 1{,}214 \times 0{,}238\ (t - \theta).$$

Si nous supposons comme nous l'avons fait jusqu'ici que les 2/3

seulement de l'oxygène soient consommés, en prenant $\theta = 15°$, nous aurons pour la quantité totale de chaleur entraînée :

1° quand $t = 150°$..... 618 calories,
2° quand $t = 300°$..... 1310 —

273. *Combustionde l'hydrogène.* — On sait que l'oxygène en brûlant l'hydrogène fournit les 9/8 deson poids d'eau, de sorte que 1 mètre cube d'air dont l'oxygène sera complétement employé à la combustion de l'hydrogène donnera les produits suivants :

Vapeur d'eau..... $0{,}010 + 0{,}278\,\frac{9}{8} = 0^{k},313$
Acide carbonique..... $0^{k},001$
Azote..... $0^{k},925$

et comme il faut $28^{m.}{,}8$ pour brûler 1 kilogramme d'hydrogène, la quantité de chaleur enlevée sera :

$$28{,}8(t-\theta)[0{,}001\times 0{,}214+0{,}925\times 0{,}244]+28{,}8\times 0{,}313[637-\theta+0{,}475(t-100)].$$

si

$t = 150°$, on obtiendra..... 6700 calories.
$t = 300°$, — ..... 8318 —

274. Si l'on suppose un excès d'air dont le volume soit V', il faudra ajouter à ces nombres la quantité :

$$V' . 1{,}214 \times 0{,}238\,(t-\theta).$$

Si nous supposons toujours que les 2/3 de l'oxygène seulement sont consommés dans la combustion, on aura pour la quantité totale de chaleur enlevée :

Pour $t = 150°$..... 7261 calories
Pour $t = 300°$..... 9503 —

275. *Combustion d'un combustible quelconque.* — Nous prendrons toujours, comme exemple, le bois à 30 pour 100 d'eau.

Soit d'abord le cas où il n'y a pas d'air en excès, et soit $t = 150°$

Pour le carbone, on aura.....	$0{,}350 \times 458$ =	160,3
Pour l'hydrogène libre, on aura.....	$0{,}005 \times 6700$ =	33,5
Pour l'eau, —	$0{,}633 \times 645{,}75$ =	408,8
Total des calories entraînées.....		602,6

si $t = 300°$,

Pour le carbone, on a.....	$0{,}350 \times 900 =$	317,8
Pour l'hydrogène libre, on a.....	$0{,}005 \times 8318 =$	41,5
Pour l'eau, on a.....	$0{,}633 \times 717 =$	453,8
		813,1

Dans le cas où les 2/3 de l'oxygène seulement sont consommés, la quantité d'air en excès est de 1,752, et il faudra ajouter respectivement aux nombres trouvés :

Pour $t = 150°$... $1{,}752 \times 1{,}214 \times 0{,}238 \times 135 =$ 68 calories.
Pour $t = 300°$... $1.752 \times 1{,}214 \times 0.238 \times 285 =$ 144 —

276. *Charbon brûlant en donnant de l'oxyde de carbone.* — Dans ce cas tout l'oxygène est employé à la combustion et 1 kilogramme de ce gaz fournit $\frac{14}{8}$ de kilogramme d'oxyde de carbone, de sorte que le poids des gaz produits par la combustion est pour un mètre cube d'air introduit :

Acide carbonique.....	$0^k{,}001$
Vapeur d'eau.....	0 ,010
Oxyde de carbone $0{,}278 \times \frac{7}{4} =$	0 ,486
Azote.....	0 ,925

et comme il faut $4^{m3},8$ d'air pour brûler 1 kilogramme de carbone, la quantité de chaleur enlevée quand $t = 150°$ sera :

$$4{,}8 \times 135[0{,}001 \times 0{,}214 + 0{,}486 \times 0{,}248 + 0{,}925 \times 0{,}244] + 0{,}048 \times 645{,}75 = 255 \text{ cal.}$$

Quand $t = 300°$ on a :

$$4{,}8 \times 285\,[0{,}001 \times 0{,}214 + 0{,}486 \times 0{,}248 + 0{,}925 \times 0{,}244] + 0{,}048 \times 717 = 509 \text{ cal.}$$

277. Lorsque l'on connaîtra, dans une même localité, les prix des différents combustibles, ainsi que les poids des différentes mesures, quand les combustibles ne sont pas vendus au poids, on trouvera facilement leurs valeurs réelles, au moyen de leurs puissances calorifiques. A Paris, par exemple, où, chez les marchands de combustibles, la houille vaut actuellement (hiver, 1875) 65 francs les 1,000 kilogrammes ; le bois, 54 francs ; le coke, 70 francs ; le charbon de bois, 200 francs ; les prix de 1000 unités de chaleur sont :

Pour la houille. ..... $\frac{0{,}065 \times 1000}{8000} = 0^f{,}0081$

Pour le bois..... $\frac{0,054 \times 1000}{2658} = 0^{f},0203$

Pour le coke..... $\frac{0,070 \times 1000}{7356} = 0^{f},0094$

Pour le charbon de bois.. $\frac{0,20 \times 1000}{6987} = 0^{f},0286$

Ainsi, à Paris, le chauffage par la houille est le plus économique ; le chauffage au coke est moins cher que le chauffage au bois ; et le chauffage au charbon de bois est le plus cher de tous.

278. On s'occupe maintenant d'introduire à Paris le chauffage par le gaz d'éclairage ; le prix de 0 fr. 30 le mètre cube auquel le gaz est livré à la consommation, rend la chose possible ; le poids d'un mètre cube de gaz est de $1^{kil},3 \times 0,4 = 0^{kil},52$ et comme sa puissance calorifique est 10269, le prix de 1000 unités de chaleur est de

$$\frac{0,30 \,.\, 1000}{0,52 \times 10269} = 0,0561.$$

Le prix du chauffage au gaz est donc sept fois celui du chauffage à la houille et le double de celui du chauffage au charbon de bois ; au point de vue d'un chauffage continu, le gaz est donc un combustible fort cher ; mais quand le chauffage doit être intermittent ou de courte durée, le gaz présente cet avantage qu'on peut l'allumer ou l'éteindre instantanément, ce qui réduit la consommation au minimum ; il en résulte aussi économie de temps ; dans ce dernier cas, le gaz peut donc être préférable au charbon de bois et même quelquefois à la houille ; il a toujours l'avantage d'une très-grande propreté.

279. La connaissance de la puissance calorifique des corps permet de calculer, dans tous les cas qui peuvent se présenter, la quantité de combustible à brûler pour produire un effet donné. Cet effet correspond toujours à un nombre N de calories à utiliser et par conséquent à produire ; et en désignant par C la puissance calorifique du combustible, la quantité qui doit être brûlée pour produire N calories est également égale à N : C. Mais, dans presque tous les cas, on ne peut utiliser qu'une certaine fraction n de la puissance calorifique du combustible, et la quantité qui doit être brûlée est égale à N : nC.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de chauffer par heure 10 mètres cubes d'eau à 40° ; en employant de la houille ; et en utilisant les trois quarts de la chaleur produite, la quantité de houille à brûler par heure dans le foyer serait évidemment égale à $10000 \,.\, 40 : 6000 = 66^{kil},6$.

S'il s'agissait de produire par heure 500 kil. de vapeur d'eau à 100°, l'eau d'alimentation de la chaudière étant à 0°, la chaleur totale de vaporisation de la vapeur étant de 637, la quantité de chaleur à produire serait de $500 . 637 = 318500^c$, et la quantité de houille à brûler par heure, dans les mêmes conditions que précédemment, serait égale à $318500 : 6000 = 53^{kil},08$.

Supposons en dernier lieu qu'il s'agisse de chauffer 20000 mètres cubes d'air par heure à 50°, dans une cheminée d'appel, où la totalité de la chaleur est utilisée, et qu'on veuille employer du bois renfermant 0,30 d'eau ; le poids d'un mètre cube d'air étant de $1^{kil},3$, le poids de l'air à réchauffer sera de $20000 . 1,3 = 26,000$ kil.; la capacité calorifique de l'air étant à peu près 0,24, on aura $N = 26000 . 0,24 . 50 = 312000^c$, et la quantité de bois à brûler sera de $312000 : 2650 = 117$ kil.

CHAPITRE XIII.

Températures produites par la combustion de différents combustibles.

280. Lorsqu'on brûle un combustible d'une manière continue, dans un foyer fermé, la chaleur produite élève progressivement la température de l'enceinte. Après un certain temps, il s'établit un régime permanent ; la surface du combustible, celle de l'enceinte et les gaz sont à une température constante, et cette température résulte de la quantité de chaleur produite par le combustible, répartie entre les gaz qui proviennent de la combustion et l'azote de l'air introduit, du moins en négligeant la chaleur transmise à travers les murs du foyer. Ainsi, dans les circonstances que nous venons d'indiquer, et qui se rencontrent dans les foyers employés au travail des métaux, la température du foyer s'obtient en divisant la puissance calorifique du combustible par la somme des poids des gaz qui s'écoulent multipliés chacun par la capacité calorifique correspondante.

Mais si l'on appliquait cette méthode de calcul dans toute sa simplicité, on arriverait à des résultats absolument en désaccord avec l'expérience ; il y a en effet deux phénomènes très-importants que l'on néglige alors ; c'est le rayonnement et la dissociation.

281. Le rayonnement enlève en effet au foyer d'une façon perma-

nente une fraction notable de la chaleur de combustion ; nous avons vu (39) que la quantité de chaleur rayonnée par le charbon de bois peut s'élever à 50 pour 100 de la chaleur totale produite ; cette chaleur rayonnée ne concourt pas à l'élévation de la température des gaz et il faudrait pouvoir en tenir compte dans le calcul. C'est là une difficulté très-réelle, en ce sens qu'il est à peu près impossible de déterminer *à priori* dans un foyer donné : 1° quelle sera la proportion de chaleur rayonnée ; 2° quelle portion de cette chaleur sera renvoyée au foyer, ou absorbée ultérieurement par les gaz. Il n'existe actuellement aucune méthode théorique ou expérimentale qui permette d'obtenir une évaluation même approximative de ces éléments. Cependant, il y a lieu de penser que dans les foyers où les températures sont relativement basses, c'est principalement à cette cause qu'il faut attribuer les différences entre les températures observées et les températures calculées.

282. La dissociation est un fait chimique dont la connaissance est récente ; elle consiste en ce que la décomposition d'un corps ne se fait pas en général d'une façon complète à une température déterminée, mais que si le corps qui se décompose et les éléments de la composition se trouvent maintenus en présence les uns des autres, il y aura une température déterminée à laquelle la décomposition commencera, et si, avec M. Sainte-Claire Deville, auquel on doit la découverte de ces phénomènes, on appelle tension de dissociation, le rapport de la quantité des éléments décomposés au poids total de la substance, on constate que cette tension va en s'élevant d'une façon constante avec la température, de telle façon que la décomposition ne deviendra complète qu'à une température très-notablement supérieure à celle pour laquelle elle aura commencé. Réciproquement, si deux corps qui peuvent se combiner sont maintenus en présence de la combinaison qui se forme, pour une température donnée à laquelle se trouvera le mélange et à laquelle la combinaison pourra se faire, il y aura une relation déterminée entre la somme des poids des éléments non combinés et le poids de la combinaison, cette relation sera fournie par la tension de dissociation.

Il résulte de là que si deux corps en se combinant dégagent une quantité de chaleur plus grande que celle que peut porter le composé formé à la température où sa dissociation commence, la combinaison ne pourra pas être instantanée, et il ne pourra tout d'abord se combiner qu'une portion des éléments en présence. Cette portion

sera celle qui fournira la chaleur nécessaire pour donner la température à laquelle le corps composé formé pourra rester intégralement dans le mélange, en vertu de la tension de dissociation à cette température. C'est cette considération qui détermine la température maxima qui peut se produire dans une action chimique. Une fois le mélange arrivé à cette température, la chaleur dégagée se perd en partie soit par rayonnement, soit par contact, et la température tend à baisser, mais alors les éléments isolés peuvent se combiner pour rétablir la température qui se maintient jusqu'à ce que l'action chimique ayant été complète, la perte de chaleur ne peut plus être compensée, et le refroidissement en est la conséquence.

M. Sainte-Claire-Deville a ainsi constaté que la température maxima qu'on peut obtenir au moyen de la combustion d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène est 2500° environ ; si l'on calculait la température en supposant la combustion complète de l'hydrogène sans perte de chaleur, on trouverait plus de 6000° ; cet exemple suffit pour faire comprendre l'importance qu'il y a lieu d'attacher à la dissociation, surtout quand le calcul mène à des températures un peu élevées.

283. Si l'état d'équilibre chimique, résultant de la dissociation que prend un mélange d'éléments divers pouvant se combiner, était connu aux différentes températures, il serait facile d'obtenir la température maxima produite par un combustible déterminé. On pourrait en effet calculer la quantité de chaleur produite par la combinaison partielle répondant à chaque température ; et d'autre part on calculerait facilement la quantité de chaleur qui amènerait, en l'échauffant, le mélange à cette même température ; et lorsque ces deux quantités de chaleur seraient égales, on aurait précisément la température maxima.

284. M. Sainte-Claire-Deville a fait voir que la dissociation de l'eau est notable vers 1200° ; il en est de même pour l'acide carbonique qui se dissocie en donnant de l'oxyde de carbone et de l'oxygène.

L'oxyde de carbone fournit en se dissociant de l'acide carbonique et du carbone. Le même savant a étudié la dissociation dans les flammes homogènes. Il se servait pour cela d'un chalumeau à oxygène et à oxyde de carbone, le dard obtenu est formé d'une masse en ignition comprise entre deux cônes, un cône intérieur qui avait à peu près un centimètre de longueur, celle-ci dépendant des vitesses relatives de sortie du gaz et de propagation de l'inflam-

mation dans ce gaz, et un cône extérieur, limite de la flamme, dont la longueur était de 6 centimètres environ. A la pointe du premier cône, le platine fond en jetant des étincelles, ce qui indique que la température y est supérieure à celle de sa fusion ; à la pointe du cône extérieure, le platine rougit seulement. Pour isoler les gaz avant leur recombinaison, on se servait d'une petite *trompe* à eau, formée d'un tube d'argent percé d'un trou de $0^m,0002$ de diamètre, qu'on présentait aux différents points de la flamme qu'on voulait étudier ; l'acide carbonique contenu dans la flamme était directement absorbé. On analysait ensuite les gaz recueillis.

A 67 millimètres de l'ouverture du chalumeau, les gaz recueillis ont fourni la composition suivante :

Oxyde de carbone.....	0,2
Oxygène.....	21,3
Azote.....	78,5

La température était celle de la fusion de l'argent.

A 10 millimètres de l'ouverture du chalumeau, c'est-à-dire un peu au delà de la pointe du cône intérieur, le gaz recueilli se composait comme suit :

Oxyde de carbone.....	55,3
Oxygène.....	35,3
Azote.....	9,4

La température était supérieure à celle de la fusion du platine, qui fondait très-vite en donnant des étincelles.

Quoique l'absence de détermination de l'acide carbonique dans ces expériences ne permette pas d'établir la tension de dissociation de ce gaz aux différentes températures, les résultats suffisent pour montrer qu'à 1000 degrés et après un refroidissement assez notable, la dissociation existe encore quant à ce qui concerne l'acide carbonique.

285. M. Bunsen a fait des expériences ayant pour but de déterminer directement la température maxima qu'on obtient par la combustion de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone. Il opérait la combustion de ces gaz dans un eudiomètre muni d'une soupape chargée au moyen d'un poids placé sur un levier. En faisant varier le poids, ou sa position sur le levier, on arrivait à déterminer le point précis où le passage de la flamme à travers la soupape est arrêté au moment de l'explosion, et par suite la tension maxima que prend le gaz ; un calcul

fort simple permet d'en déduire la température maxima qui s'est produite. (*Annales de Poggendorf*, t. CXXXI.)

Il résulte des expériences de M. Bunsen :

1° Que la vitesse de propagation de l'inflammation dans un mélange détonant d'hydrogène et d'oxygène ou d'oxyde de carbone et d'oxygène est d'environ 34 mètres par seconde ;

2° Que dans un mélange détonant d'oxygène et d'oxyde de carbone en proportions exactes, la température maxima produite est de 3033° ;

3° Qu'avec un mélange détonant en proportions exactes d'oxygène et d'hydrogène, la température s'élève à 2844° ;

4° Que dans un mélange détonant, en proportions exactes, d'air atmosphérique et d'oxyde de carbone, la température produite est de 1997° ;

5° Enfin que dans un mélange détonant, en proportions exactes, d'hydrogène et d'air atmosphérique, la température maxima est égale à 2024° ;

On déduit de là que pour un mélange détonant à proportions exactes d'oxygène et d'hydrogène ou d'oxyde de carbone, le tiers seulement du gaz combustible brûle et fournit la température observée, tandis que les deux autres tiers ne peuvent se combiner.

D'autres expériences faites en ajoutant au mélange détonant des proportions variables de gaz non combustibles ont prouvé que lorsque la température de combustion est comprise entre 2471° et 1146°, la quantité de gaz qui brûle n'est que la moitié de celle du gaz combustible.

286. Les températures obtenues par M. Bunsen sont plus élevées que celles qu'on obtiendrait de la combustion à l'air libre ; en effet, dans ces expériences, il n'y a pas de travail extérieur exercé par les gaz pendant la combustion, et on se sert pour les calculer de la capacité calorifique des gaz à volume constant; dans le cas où le gaz brûle à l'air libre il y a travail extérieur, et c'est la capacité calorifique à pression constante qui intervient. Quoi qu'il en soit, ce qu'il est important de considérer dans les expériences de M. Bunsen, c'est la proportion des éléments qui se combinent tout d'abord pour donner la température maxima.

287. M. Sainte-Claire Deville a publié en 1865 dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, et antérieurement aux travaux de M. Bunsen, une expérience dont celles que nous venons d'indiquer forment la contre-partie. Le premier savant cherchait à déter-

miner l'état d'équilibre d'un mélange d'oxygène, d'oxyde de carbone et d'acide carbonique à une température élevée au moyen de la décomposition de l'acide carbonique par une série prolongée d'étincelles électriques courtes et très-peu volumineuses. Dans ce cas le refroidissement de la partie traversée par l'étincelle étant très-rapide, la recombinaison des gaz ne se fait pas, et en prolongeant suffisamment l'expérience on arrive à un mélange qui ne change plus de composition : M. Sainte-Claire-Deville a trouvé qu'après deux jours de passage continu de l'étincelle, le gaz provenant de la décomposition de l'acide carbonique présente la composition suivante :

Oxygène.....	12,2
Oxyde de carbone.....	24,0
Acide carbonique.....	63,8

288. Les conclusions qu'on peut tirer de ces résultats s'écartent notablement de celles que fournissent les expériences de M. Bunsen ; en effet dans les expériences de M. Bunsen, le rapport de l'acide carbonique à celui de l'oxyde de carbone est de 1 à 2 volumes pour les températures supérieures à 2500° et de 1 à 1 pour les températures inférieures, tandis que dans l'expérience de M. Sainte-Claire-Deville, le rapport est de 2, 6 à 1. Il est d'ailleurs facile de se rendre compte de ces différences qui tiennent aux méthodes mêmes employées par les expérimentateurs. Dans le cas des déterminations de M. Bunsen, il y a toujours un refroidissement du gaz dont il est impossible de tenir compte, la température observée est donc trop faible ; il s'ensuit que le calcul donne pour la proportion des éléments combinés un nombre trop faible ; dans l'expérience de M. Sainte-Claire-Deville, le refroidissement du gaz sur le passage de l'étincelle, quoiqu'excessivement rapide, n'est pas absolument instantané, et il y a recombinaison partielle des éléments séparés par le courant électrique. La véritable proportion est donc comprise entre les deux séries de rapports indiquées ; mais les valeurs fournies par ces deux séries sont trop éloignées pour qu'on puisse songer à prendre une moyenne, et, d'un autre côté, il est bien difficile d'établir l'influence des causes d'erreurs que nous avons signalées. Cependant, par des observations directes, M. Bunsen a montré que le refroidissement qui se produit dans ses expériences est sensiblement négligeable, et cela résulte de ce que la durée de l'inflammation complète n'est que 1/4000 de seconde, tandis qu'après 1/65 de seconde les gaz manifestent encore une vive lumière. Il y a donc lieu d'accepter comme à peu près exacts les nombres de M. Bunsen.

289. Partant de là, lorsque la combustion se fera en présence de l'air atmosphérique, il y aura lieu d'admettre avec M. Bunsen que les proportions de gaz qui fournissent l'équilibre chimique répondant à la température maxima sont fournies par les nombres suivants :

Acide carbonique.....	2 volumes
Oxyde de carbone.....	2 —
Oxygène.....	1 —

plus la proportion d'azote qui répond à la quantité d'oxygène qui se trouve dans les différents éléments du mélange.

Dans le cas de l'hydrogène, M. Bunsen a trouvé pour le cas de la combustion en présence de l'air atmosphérique les proportions suivantes :

Vapeur d'eau.....	2 volumes
Hydrogène.....	2 —
Oxygène.....	1 —

plus l'azote de l'air ayant servi à la combustion.

290. *Température maxima obtenue par la combustion de l'hydrogène en présence de l'air.* — Nous avons vu que dans le cas de la combustion de l'hydrogène en présence de l'air et sous volume constant, M. Bunsen a trouvé que la température maxima est de 2024 environ, et il en a déduit que la quantité d'hydrogène qui brûle est les 0,55 de la quantité totale ; si l'on suppose que cette proportion reste constante pour les températures comprises entre 1200 et 2400°, on pourra s'en servir au calcul de la température maxima produite dans la combustion à l'air libre, et la température obtenue sera exacte si elle est comprise entre 1200 et 2400°.

Pour faire le calcul, nous remarquerons que lorsqu'on détermine la puissance calorifique de l'hydrogène, l'eau formée est complétement condensée, et sa chaleur latente de vaporisation entre dans la valeur de la puissance calorifique de l'hydrogène. Si donc on n'en tient pas compte dans le calcul de la température maxima, il faudra la retrancher de la puissance calorifique de l'hydrogène ; et cette puissance calorifique deviendra, comme nous l'avons déjà vu, égale à 29000.

Cette observation a été faite pour la première fois par MM. Thomas et Laurens, à la suite d'expériences qui avaient donné pour l'hydrogène une température bien inférieure à celle qui devait résulter de la puissance calorifique de ce corps.

Soit donc 1 kilogramme d'hydrogène mis en présence de l'air ; il

exigerait pour brûler 8 kilogrammes d'hydrogène qui dans l'air se trouvent mélangés avec $26^{kil},8$ d'azote si l'on suppose que les 0,55 de l'hydrogène brûlent seulement, la composition en poids des produits de la combustion de 1 kilogramme d'hydrogène sera :

Hydrogène,.....	0,45
Vapeur d'eau.....	4,95
Oxygène.....	3,05
Azote.....	26,00

En appelant t la température cherchée, et en égalant la quantité de chaleur que perdraient les produits de la combustion si on les ramenait à zéro, à la quantité de chaleur qui résulte de la puissance calorifique de l'hydrogène, on aura :

$$t(0,45\times 3,404+4,95\times 0,475+3,05\times 0,218+26,8\times 0,244)=0,55\times 29000,$$

d'où

$$t=1439°.$$

On observera que nous n'avons pas tenu compte du rayonnement dans le calcul de la température maxima; c'est qu'en effet, outre que les gaz par eux-mêmes rayonnent très-peu, la quantité de chaleur qui serait emportée par ce rayonnement serait bien inférieure à celle qui peut être rendue par la combustion ultérieure des 0,45 d'hydrogène restés libres, combustion qui, comme nous l'avons vu, maintient pendant un certain temps la température à son maximum.

291. *Température maxima obtenue par la combustion de l'oxyde de carbone en présence de l'air atmosphérique.* — Nous admettrons avec M. Bunsen que la proportion de gaz qui brûle pour développer la température maxima est, pour l'intervalle compris entre 1146° et 2471°, égale à la moitié de la quantité totale du gaz combustible.

14 kilogrammes d'oxyde de carbone exigent pour brûler complétement 8 kilogrammes d'oxygène qui, dans l'air atmosphérique, sont mélangés avec 26,8 kilogrammes d'azote; il en résulte que si les 0,50 seulement de l'oxyde de carbone brûlent, la composition des gaz de la combustion de 1 kilogramme d'oxyde de carbone sera :

Oxyde de carbone.....	0,500
Acide carbonique.....	0,785
Oxygène.....	0,285
Azote.....	1,865

L'équation qui fournira la température maxima sera donc :

$$t\,[0{,}500\times0{,}248+0{,}785\times0{,}216+0{,}285\times0{,}218+1{,}865\times0{,}244]=0{,}500\times2403,$$

d'où

$$t=1483^{\circ}.$$

292. *Température maxima obtenue par la combustion du carbone pur brûlant en présence de l'air atmosphérique.* — D'après M. Bunsen, l'équilibre chimique d'un mélange d'acide carbonique, d'oxyde de carbone et d'oxygène, dans lequel ce dernier gaz est en quantité suffisante pour amener tout le carbone à l'état d'acide carbonique, entre les températures de 1146° et 2471°, répond aux proportions suivantes :

Oxyde de carbone.....	2 volumes
Acide carbonique.....	2 —
Oxygène.....	1 —

plus la quantité d'azote mélangé dans l'air atmosphérique avec l'oxygène employé; il en résulte que la composition des produits de la combustion de 1 kilogramme de charbon donnant la température maxima sera :

Oxyde de carbone.....	$1^{k},167$
Acide carbonique.....	$1^{k},833$
Oxygène.....	$0^{k},667$
Azote.....	$8^{k},920$

de sorte que dans la combustion la moitié du poids du carbone passe à l'état d'acide carbonique et l'autre moitié à celui d'oxyde de carbone. L'équation qui donnera la température maxima sera :

$$t[1{,}167\times0{,}248+1{,}833\times0{,}216+0{,}667\times0{,}218+8{,}928\times0{,}244]=0{,}5\times8080+0{,}5\times2473,$$

d'où

$$t=1758^{\circ}.$$

Quoiqu'il s'agisse ici d'un combustible solide, il n'y a pas lieu de tenir compte du rayonnement du foyer dans le calcul de la température maxima, c'est qu'en effet le nombre de calories produites par 1 kilogramme de carbone dans les conditions de combustion que nous avons supposées est de 5277, or en admettant au maximum un rayonnement de 50 pour 100, il s'en suivrait une perte de 2638 calories;

mais l'achèvement de la combustion complète du carbone, qui sera la conséquence de cette perte de chaleur, peut produire 8000 — 5277 = 2803 calories, c'est-à-dire une quantité qui peut être supérieure à la perte dans des foyers convenablement disposés et qui maintient la température.

Cette température calculée de 1758° est probablement plus faible que celle qu'on peut obtenir réellement, car, d'après M. Deville, on peut fondre le platine dans une petite forge alimentée avec des escarbilles (*Chimie de Malaguti*, 3e édition, t. II, p. 553).

293. *Température maxima obtenue par la combustion d'un combustible quelconque en présence de l'air atmosphérique.* — Nous supposerons pour faire le calcul dans ce cas que les conditions de dissociation de l'eau et de l'acide carbonique sont les mêmes dans ce cas que si le carbone et l'hydrogène brûlaient séparément; cette hypothèse est fort probable, mais nous ne connaissons pas d'expérience qui la vérifie.

Nous avons vu plus haut que dans la combustion de 1 kilogramme d'hydrogène, la quantité de chaleur produite est de 15950 calories et que le nombre de calories qui élève de 1° la température du gaz de la combustion est de 11,085; pour le cas de la combustion de 1 kilogramme de carbone, le nombre de calories produites est de 5277 et celui des calories qui élèvent de 1° la température du gaz de la combustion est égale à 3 ; partant de là, si nous représentons par H la quantité d'hydrogène et C, celle de carbone contenues dans 1 kilogramme du combustible ; si de plus P représente la puissance calorifique du combustible déterminée en supposant que l'eau des produits de la combustion ne se condense pas, la quantité de chaleur que perdraient les produits de la combustion pour passer de la température maxima t à 0° serait :

$$t\,(11{,}085\,H + 3\,C).$$

La quantité de chaleur qui pourrait être produite par l'achèvement complet de la combustion sera représentée par :

$$13050\,H + 2803\,C,$$

et par suite la quantité de chaleur produite dans la combustion deviendra :

$$P - 13050\,H - 2803\,C.$$

On aura donc l'équation :

$$t\,(11{,}085H + 3C) = P - 13050H - 2803C,$$

formule qui sera applicable dans le cas où la température obtenue sera comprise entre 1146° et 2471°; on pourra faire intervenir dans ce cas les mêmes considérations qui nous ont servi à établir pour l'hydrogène et le carbone l'absence d'influence du rayonnement sur la température maxima.

Appliquons cette formule au protocarbure d'hydrogène. On a dans ce cas :

$$H = 0{,}25 ; \quad C = 0{,}75 ; \quad P = 12700 ;$$

on en tire :

$$t = 1461°.$$

294. La formule que nous venons d'établir suppose que le combustible ne contient que du carbone et de l'hydrogène; or, dans les combustibles industriels, on trouve encore de l'oxygène, de l'azote, de l'eau hygrométrique et des cendres.

L'influence des cendres peut être assimilée à un refroidissement extérieur et par conséquent n'a pas plus d'influence que le rayonnement.

L'azote est en général en quantité assez faible pour être négligé.

L'oxygène entre toujours dans le combustible en quantité plus faible que celle qui formerait de l'eau avec le combustible ou au plus égale à cette quantité, et par conséquent se trouve compris dans la masse des gaz qui résultent de la combustion.

295. *Influence de l'eau.* — Soient p le poids de l'hydrogène libre dans le combustible, et p' le poids de l'hydrogène entrant à la fois dans l'eau de combinaison et dans l'eau d'hydratation : le poids de l'hydrogène total sera $p + p'$ et la quantité d'hydrogène qui sera libre dans les produits de la combustion par suite de la dissociation sera : $0{,}45\,(p + p')$; celle qui entrera dans l'eau des produits de la combustion sera $0{,}55\,(p + p')$ et le poids de cette eau sera $0{,}55 \times 9\,(p+p')$.

La composition des gaz de la combustion résultant de la dissociation sera :

Hydrogène.....	$0{,}45\,(p+p')$
Vapeur d'eau.....	$0{,}55 \times 9\,(p+p')$
Oxygène.....	$3{,}05\,(p+p')$
Azote.....	$26{,}8\,(p+p')$

et la quantité de chaleur qui élèvera de t la température de ces produits, l'eau étant vaporisée sera :

$$t\,[(11{,}085\,(p+p')] + 0{,}55 \times 9 \times 537\,(p+p') ;$$

d'un autre côté la puissance calorifique qui restera disponible dans les gaz de la combustion sera $0{,}45\ (p+p') \times 34462$. Si donc C représente la quantité de carbone du combustible et si P représente sa puissance calorifique, en supposant l'eau condensée il viendra :

$$t\,[11{,}085\,(p+p')+3C]+0{,}55\times 9\times 537\,(p+p') = P_1 - 0{,}45\,(p+p')\,34462 - 2803C,$$

ou enfin

$$t\,[11{,}085\,(p+p')+3C] = P_1 - 18166\,(p+p') - 2803C,$$

d'où

$$t = \frac{P_1 - 18166\,(p+p') - 2803C}{11{,}085\,(p+p')+3C},$$

formule qui pourra s'appliquer quand la valeur de t qu'on obtiendra sera comprise entre 1146° et 2471°.

Cette formule suppose toujours que la perte par le rayonnement n'atteint pas à la quantité de chaleur qui résulte de l'achèvement de la combustion.

296. Les températures que l'on calcule au moyen de ces diverses formules conduisent à des nombres qui doivent être considérés comme un peu faibles. Nous l'avons fait voir pour le carbone pur, on peut aussi le vérifier pour le gaz d'éclairage. La température maxima calculée pour ce combustible est égale à 1477°.

M. Schlœsing au moyen du gaz d'éclairage et de l'air produit une température suffisante pour fondre le fer. Pour cela il emprisonne la substance à chauffer dans un espace restreint formé par la cavité d'une enveloppe en brique réfractaire, on insuffle de l'air au moyen d'un soufflet de M. Enfer dans un tube où arrive le gaz d'éclairage.

MM. Forquignon et A. Leclerc ont modifié les dispositions de l'appareil (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1873), ce qui leur permet de fondre 38^{gr}, 40 de fer dans un petit creuset de biscuit, en douze minutes.

On sait que la température de fusion du fer n'est pas évaluée à moins de 1500° ou 1600° suivant son état moléculaire.

297. *Influence de la température initiale du combustible et de l'air.* — Il est évident que si au lieu de supposer ces substances à la température de 0°, comme nous l'avons fait jusqu'ici, nous le supposons à une température θ, la température maxima des produits de la combustion se trouvera augmentée de θ, si les conditions que nous avons supposées pour la dissociation ne sont pas changées. C'est ce qui

arrivera lorsque la température maxima, à laquelle on sera conduit par le calcul, ne dépassera pas 2400°; au delà de 2500, les conditions de la dissociation se modifient, et les formules qui servent au calcul devront être changées en conséquence. On n'aura pas, en général, à le faire pour les cas de la pratique.

298. Dans un foyer où on brûle des combustibles solides, lorsqu'à la suite de l'allumage et d'une première combustion, tous les produits volatils ont été éliminés, on se trouve sensiblement dans le cas de la combustion du carbone pur, et on peut admettre que le charbon du foyer se trouve alors à une température voisine de la température maxima des gaz de la combustion; il en résulte qu'au point de vue de la combustion ultérieure, il y a lieu de supposer le combustible déjà échauffé à une température de 1700 à 1800°, et comme la capacité calorique du coke, du charbon de bois, etc., est à peu près 0,20, il en résulte qu'on a de ce fait environ 360 calories disponibles. Ce qui augmente la température maxima d'environ 120°. Or, nous avons trouvé pour le carbone pur 1758°, on se trouverait amené ainsi à 1878°, température à peu près égale à celle qui a été réalisée par M. Deville dans la fusion du platine.

299. Quand il s'agit des combustibles gazeux, il n'y a pas lieu de compter sur cette cause d'élévation de la température; mais on peut, comme on fait dans un grand nombre de circonstances, élever au préalable la température du gaz combustible et celle de l'air; ce qui élève d'autant la température maxima.

300. *Influence de la pression.* — Il y a quinze ans déjà que, dans son Cours de physique industrielle à l'École centrale, Thomas indiquait qu'on pouvait obtenir des températures plus élevées par la combustion, en élevant la pression. En 1868, M. Frankland fait voir que les flammes sont d'autant plus lumineuses qu'elles se produisent sous une plus grande pression; et M. Sainte-Claire-Deville signale dans les flammes observées au spectroscope, un plus grand nombre de raies brillantes et une intensité plus grande de ces raies quand la pression augmente; il en conclut que la température s'élève (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*). Enfin M. Cailletet a vérifié le même fait sur la flamme d'une bougie, sur celle d'une lampe à alcool, sur le soufre, le sulfure de carbone. Suivant les conditions dans lesquelles on se place, il peut y avoir deux causes différentes de l'augmentation de la température : la première est la diminution de la tension de dissociation; la seconde, lorsque la combustion se fait en vase clos, provient de ce que la combustion

se fait sous volume constant, et qu'alors les capacités calorifiques, à volume constant, se substituent aux capacités calorifiques à pression constante.

301. Au premier abord, il semble que l'air ne coûtant rien la combustion peut s'effectuer sans dépense sous ce rapport; mais il n'en est pas ainsi, parce qu'il faut un certain travail pour faire arriver l'air sur le combustible; ce travail est produit, tantôt par des machines qui injectent l'air dans le foyer ou appellent l'air brûlé, tantôt par des cheminées qui versent l'air brûlé dans l'atmosphère à une température plus ou moins élevée. Ainsi il y a toujours dans tous les appareils de chauffage une certaine perte de chaleur, directe quand la combustion a lieu par l'appel d'une cheminée, et indirecte quand la combustion a lieu par un ventilateur aspirant ou soufflant; et par suite, toute la chaleur produite n'est pas utilisée. Il y a cependant certaines dispositions de cheminées produisant un grand tirage, dans lesquelles l'air brûlé peut être abandonné à la température ordinaire. Je reviendrai sur ces questions avec tous les détails nécessaires, en parlant des cheminées et du tirage mécanique.

On désigne ordinairement sous le nom d'*air brûlé* les gaz qui résultent de la combustion d'un corps par l'air : quoique cette expression soit fort inexacte, nous la conserverons, parce qu'elle est admise et qu'elle simplifie le langage.

302. Nous allons maintenant nous occuper des lois des mouvements des gaz. La connaissance de ces lois est indispensable pour la disposition des appareils de chauffage et de ventilation; car dans tous, quel que soit le but qu'on se propose, on a toujours de l'air à mettre en mouvement. Les mouvements de l'air sont produits tantôt par une pression résultant d'une action mécanique, tantôt par la force ascensionnelle de l'air échauffé.

LIVRE II

ÉCOULEMENT DES GAZ COMPRIMÉS.

303. Nous avons vu dans le livre précédent qu'il y a nécessité de faire arriver sur le combustible qu'on veut brûler, la quantité d'air nécessaire à la combustion; de plus cet air doit circuler dans des conduits ou carneaux où il se trouve en contact avec les corps à chauffer. Dans certains cas, l'air est lancé sous une pression plus ou moins considérable sur le combustible à brûler. Ces conditions de l'écoulement et du mouvement des gaz sont donc à examiner pour arriver à déterminer les dimensions des différentes parties de l'appareil de chauffage qu'on veut construire.

Les parois des appareils de chauffage de grande dimension généralement construites en briques sont poreuses et peuvent fournir des rentrées d'air, pouvant prendre des valeurs diverses quoique toujours très-faibles. Il nous a paru utile d'en fournir les éléments de détermination.

Enfin, la vapeur d'eau est souvent employée comme moyen de chauffage, et la production de ce fluide sera l'un des objets importants du second volume de cet ouvrage; mais nous avons cru devoir ne point séparer l'étude du mouvement de la vapeur de celui des autres gaz.

La matière de ce livre comprendra donc l'étude théorique et expérimentale des questions suivantes :

1° Écoulement des gaz sous de faibles pressions par un orifice en mince paroi;

2° Écoulement des gaz sous de grandes pressions par un orifice en mince paroi;

3° Influence des ajutages cylindriques ou coniques; frottements dans les tuyaux de conduite; influence des changements de direction et de forme des tuyaux;

4° Passage de l'air à travers les murs sous de faibles pressions;

5° Écoulement de la vapeur.

CHAPITRE PREMIER

Écoulement des gaz sous de faibles pressions par un orifice en mince paroi.

304. Supposons une cloche fermée à la partie supérieure, ouverte en dessous, plongée dans un réservoir plein d'eau et renfermant un gaz quelconque. Le gaz sera soumis, à cause du poids de la cloche, à une pression supérieure à celle de l'atmosphère, et l'excès de pression pourra être mesuré par un manomètre à eau ou à mercure. Si l'on ouvre un orifice percé sur la cloche, le gaz s'écoulera, la cloche s'abaissera, et la pression du gaz restera sensiblement constante pendant la descente. Il est facile d'estimer cette pression en hauteur d'eau; car si P représente le poids de la cloche en kilogrammes, et S la section en décimètres carrés, P : S sera la charge en décimètres d'eau, c'est-à-dire la différence de hauteur qu'indiquerait un manomètre à eau placé sur la cloche.

305. Pour obtenir la vitesse d'écoulement d'un gaz en fonction de la pression qu'il supporte et de celle de l'espace dans lequel il s'écoule, on a assimilé les gaz aux liquides. Or, pour un liquide à niveau constant, contenu dans un vase ouvert, ayant une grande section relativement à la surface de l'orifice d'écoulement, on a trouvé par l'expérience que la vitesse du liquide est celle qu'acquerrait un corps en tombant d'une hauteur égale à celle d'une colonne du liquide qui s'écoule, capable de faire équilibre à la différence des pressions sur l'orifice, de quelque manière que cette pression soit produite. La vitesse d'écoulement v est alors représentée par la formule

$$v = \sqrt{2gP},$$

P étant la charge sur l'orifice en hauteur du liquide ou du gaz qui s'écoule.

306. Il résulte d'abord de cette formule, en admettant qu'elle soit applicable à tous les fluides, que sous la même charge les gaz s'écoulent avec des vitesses beaucoup plus grandes que les liquides, car les valeurs de P sont en raison inverse des densités. Par exemple, pour l'air et l'eau à 0° et sous la pression de $0^m,76$, les valeurs de P seraient dans le rapport de 1 à 0,0013, et les vitesses dans celui de

27,73 à 1. En supposant que de l'air à 0° s'écoule successivement sous des pressions en eau de

$$0^m,10 \qquad 0^m,01 \qquad 0^m,001 \qquad 0^m,0001,$$

les vitesses d'écoulement seraient de

$$38^m,78 \qquad 12^m,19 \qquad 3^m,88 \qquad 1^m,22;$$

tandis que les vitesses d'écoulement de l'eau sous les mêmes pressions seraient de

$$1^m,4 \qquad 0^m,44 \qquad 0^m,14 \qquad 0^m,044.$$

307. En admettant qu'un gaz s'écoule comme un liquide de même densité, si on représente par B la pression du gaz, exprimée en mètres de mercure, par b la pression extérieure, par t la température, et par d la densité tabulaire du gaz, on trouve

$$P = \frac{(B - b) \cdot 13,59 \cdot 0,76\,(1 + at)}{0,0013\,Bd},$$

et en mettant pour $2g$ sa valeur 19,62, on a

$$v = \sqrt{2gP} = 395\sqrt{\frac{B - b}{Bd}}\,(1 + at) \qquad (B).$$

Il résulte de cette formule que v croît très-lentement avec B, pression que supporte le gaz, car si on suppose $B = 2b$ $(B - b)$: B devient égal à 0,5 ; et pour B infini, cette même fraction devient 1 ; ainsi, depuis un excès de pression égal à une atmosphère jusqu'à l'infini, la vitesse d'écoulement augmente seulement dans le rapport de 0,707 à 1. Cette faible variation de la vitesse résulte de l'accroissement de la densité du gaz qui est proportionnelle à la pression totale. Les liquides étant à peu près incompressibles s'écoulent avec des vitesses qui croissent beaucoup plus rapidement, car elles sont proportionnelles aux racines carrées des pressions et n'ont par conséquent pas de limites.

308. Mais les poids des gaz écoulés varient suivant d'autres lois que les vitesses et par suite que les volumes. En désignant par S la surface de l'orifice ; par Q et par p, le volume et le poids du gaz écoulé par seconde ; et par D le poids d'un mètre cube de gaz comprimé, on aura évidemment $Q = Sv$, et $p = SvD$, et comme

$D = 1^k3.d.\ B : 0{,}76\ (1 + at)$, B étant exprimé en hauteur de mercure, on trouve pour le poids p :

$$p = 675S\sqrt{\frac{(B - b)\ Bd}{1 + at}}.$$

Ainsi le poids du gaz écoulé augmente constamment avec la pression; et il serait sensiblement proportionnel à la pression, si b était très-petit relativement à B.

309. Dans toutes les expériences qui ont été faites pour vérifier la formule (B), on mesurait le volume du gaz écoulé pendant un certain temps par l'abaissement de la cloche, on en déduisait le volume écoulé pendant une seconde, et on comparait ce volume avec celui qui était donné par les formules

$$Q = v\ .\ S; \qquad \text{ou} \qquad Q = S\sqrt{2gP} \qquad (C).$$

Les expériences ont fait voir que la valeur de Q observée est toujours plus faible que celle qui résulte de la formule (B); et on a reconnu que, dans certaines limites de pression et pour des orifices de même nature, le volume réel était égal à une fraction constante φ du volume calculé ; alors, en désignant par Q′ le premier, par Q le second, on a pu poser la formule

$$Q' = \varphi Q = \varphi S\sqrt{2gP}.$$

310. Le facteur φ pourrait être considéré comme affectant la vitesse ou la section. Pour les liquides, il est parfaitement démontré qu'il s'applique à la section de la veine à la sortie de l'orifice, section qui éprouve une contraction résultant de ce que le liquide afflue vers l'orifice dans toutes les directions. Newton a mesuré les dimensions de la veine contractée; cette mesure a été répétée par plusieurs ingénieurs, et en dernier lieu par MM. Poncelet et Lesbros; il résulte de ces expériences, et surtout des dernières, que la contraction a lieu à une distance de l'orifice sensiblement égale à la moitié du diamètre de cet orifice, et que la contraction représente à très-peu près la perte de dépense.

311. L'existence de la vitesse due à la charge dans la veine contractée a été vérifiée pour la partie du jet, quand l'orifice est percé dans une paroi verticale. Lorsqu'une veine d'eau s'écoule dans les circonstances que nous venons d'indiquer, en désignant par h la charge au-dessus de l'orifice, par a la distance du centre de l'orifice

à un plan horizontal situé au-dessous, par x et y les coordonnées d'un point de la courbe décrite par la veine, on a :

$$y = a - \frac{gt^2}{2}; \; x = vt; \quad \text{d'où} \quad x^2 = \frac{2v^2(a-y)}{g},$$

équation d'une parabole. En substituant pour v^2 sa valeur $2gh$, on trouve

$$x^2 = 4h(a-y).$$

Cette équation donne pour $y = 0$, ou pour la portée du jet, $x = 2\sqrt{ah}$. En déterminant par l'expérience la portée du jet, Bossut a trouvé, pour le rapport de la valeur calculée à la valeur observée, 0,97 et 0,98, plus tard Micholetti a trouvé pour ce rapport 0,993 et 0,998.

312. Ainsi, pour l'eau, il est démontré que la perte de dépense provient uniquement de la contraction de la veine, et que dans tous ses points la vitesse d'écoulement est égale à celle qui est due à la charge. On ne peut pas douter qu'il n'en soit ainsi pour les gaz, car ils se comportent toujours, du moins pour de faibles charges, comme des liquides de même densité. D'ailleurs, l'accroissement de vitesse par de courts ajutages cylindriques ne peut s'expliquer que par une contraction de la veine à la sortie du vase, et l'identité des résultats de l'expérience et du calcul, comme nous le verrons plus loin, ne laisse aucun doute sur le fait de la contraction de la veine, ni même sur le fait important qu'elle représente complétement la diminution de la dépense.

Nous allons citer maintenant les résultats des expériences qui ont été faites sur l'écoulement des gaz comprimés.

313. *Expériences de M. Girard* (*Annales de physique et de Chimie*, t. XVI, 1821). — Ces expériences ont été faites au moyen d'un gazomètre ayant une section transversale de $0^{mq},3631$. L'écoulement a eu lieu à travers un orifice de $0^{m},01579$ de diamètre, percé dans une plaque de $0^{m},002$ d'épaisseur, sous une pression d'eau de $0^{m},03383$; la température n'a point été indiquée. Le volume d'air écoulé par seconde a été de $0^{mc},003289$; la section de l'orifice étant de $0^{mq},0001955$, la vitesse d'écoulement était de $16^{m},823$. En admettant que la température ait été de 15°, et la pression atmosphérique de $0^{m},76$, la vitesse due à la pression était de $23^{m},20$; d'où l'on déduit que le coefficient de correction était 0,725.

314. La même expérience ayant été répétée avec le gaz de l'éclairage, le volume de gaz écoulé en une seconde a été de $0^{mc},004422$;

et par conséquent la vitesse d'écoulement était de $22^m,62$. La densité du gaz d'éclairage étant 0,555, la vitesse d'écoulement due à la pression est de $31^m,17$; et par conséquent le coefficient de la correction est 0,725.

On ne peut rien conclure de ces expériences relativement au coefficient de correction pour un orifice en mince paroi ; mais elles démontrent l'exactitude de la loi admise, que, sous les mêmes pressions, les vitesses d'écoulement sont bien en raison inverse des racines carrées des densités des gaz.

315. En 1022, M. Lagerghelm fit de nombreuses observations sur l'écoulement de l'air atmosphérique par des orifices pratiqués en mince paroi, et sur l'aspiration qui a lieu à l'extrémité d'un tuyau court terminé par une plaque percée d'un orifice par lequel l'air pénètre sous différentes pressions. Le travail de M. Lagerghelm a été communiqué à l'Institut par M. Olivier ; c'est du rapport des commissaires chargés d'en rendre compte que nous avons extrait ce qui suit.

316. L'appareil consistait en une cloche cylindrique en cuivre, plongée dans une cuve pleine d'eau. Un large tuyau venait s'ouvrir sous la cloche au-dessus du niveau de l'eau, et, après avoir traversé la cuve, s'élevait verticalement à une certaine hauteur où il était fermé par une plaque métallique mince, percée d'un orifice. L'excès de pression du gaz se mesurait par un manomètre à eau, et le volume de gaz écoulé, par l'abaissement de la cloche. Les diamètres de l'orifice d'écoulement étaient $0^m,012$, $0^m,024$, $0^m,033$; les pressions manométriques ont été de $0^m,058$ et $0^m,479$, en eau ; le coefficient de correction moyen a été de $0^m,62$; mais il a varié de 0,58 à 0,70. Ces variations ont été beaucoup trop considérables pour qu'on puisse admettre que les expériences aient été faites avec les soins convenables, et pour qu'on puisse en déduire un chiffre certain pour le coefficient de correction.

317. En 1826, d'Aubuisson, ingénieur des mines, a fait de nouvelles recherches sur l'écoulement de l'air comprimé, au moyen d'un apppareil semblable à celui que nous venons de décrire (*Annales des Mines*, 1826).

La cloche renfermant l'air comprimé avait $0^m,65$ de diamètre et $0^m,80$ de hauteur. Les orifices étaient percés dans une plaque de fer-blanc ; les diamètres ont varié de $0^m,01$ à $0^m,03$; les pressions, de $0^m,028$ à $0^m,144$; le coefficient de correction, de 0,63 à 0,67, et sa valeur moyenne, déduite de vingt expériences, a été 0,65.

318. *Nouvelles expériences.* — Je me suis servi de l'appareil dont les figures 3 et 4 représentent deux coupes verticales. A est une cloche cylindrique en tôle galvanisée de $0^m,80$ de hauteur, de $0^m,615$ de diamètre et de $0^{mq},2970$ de section, fermée par le haut, ouverte par le bas. Elle est soutenue par une corde qui passe sur deux poulies en cuivre très-mobiles, G et H, et qui se termine par un

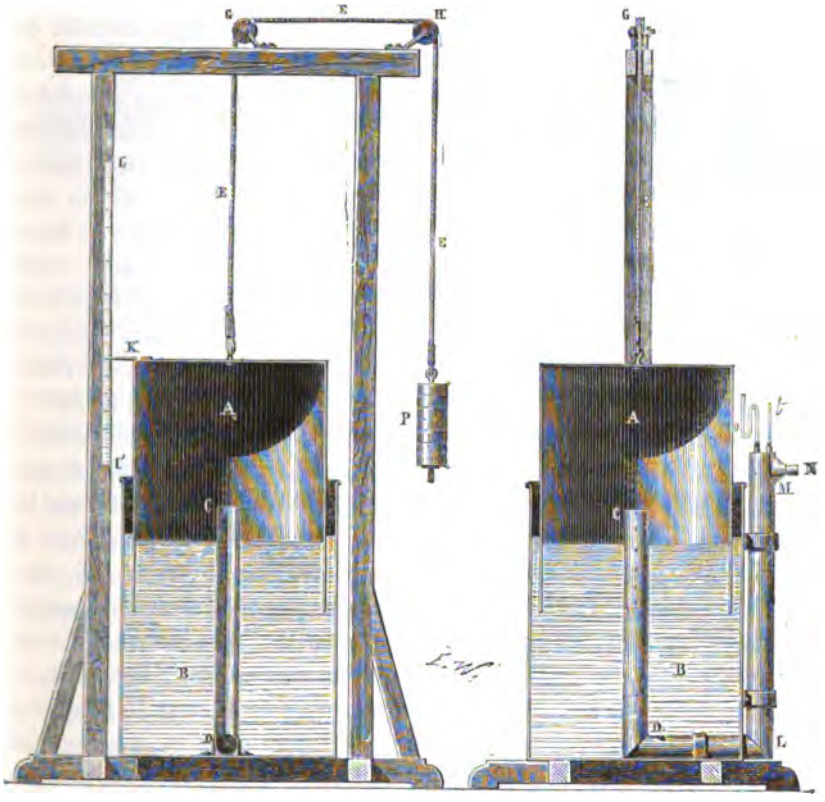


Fig. 3. *Fig.* 4.

contre-poids P. Cette cloche plonge dans une cuve pleine d'eau B, également en fer galvanisé, de $0^m,72$ de diamètre et de $0^m,80$ de hauteur. Au centre de cette cuve se trouve un tuyau CDLM de $0^m,12$ de diamètre, s'ouvrant au-dessus du niveau de l'eau dans la cuve et se relevant extérieurement : son extrémité est fermée et porte deux douilles dans lesquelles on place un thermomètre et un manomètre à eau. Une douille latérale N sert à recevoir les tubes par lesquels l'air doit s'écouler. Depuis les premières expériences,

l'extrémité supérieure du tube extérieur a été recourbée à angle droit (*fig.* 5), et l'orifice libre pouvait être fermé par une douille garnie d'une ouverture de $0^m,08$, contre laquelle on fixait avec de la cire molle des plaques percées de différents orifices. Pour d'autres expériences, l'ouverture libre était fermée par une plaque garnie d'une douille (*fig.* 6), dans laquelle on fixait, à l'aide d'un bouchon de liége, les tubes par lesquels l'écoulement devait avoir lieu. Enfin, dans certains cas, on plaçait à l'extrémité du tuyau d'écoulement une boîte rectangulaire portant latéralement et à son extrémité une large ouverture, sur laquelle on fixait des plaques percées d'orifices.

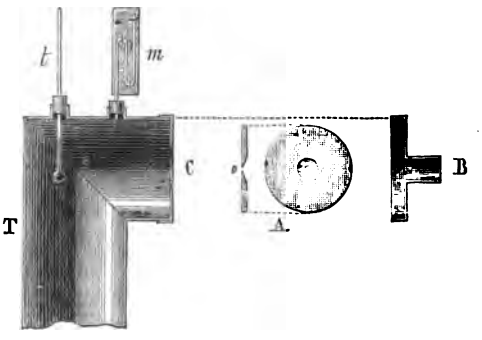


Fig. 5.

Fig. 6.

Sur la surface de la cloche, se trouvait un index horizontal K (*fig.* 3), dont l'extrémité parcourait, pendant sa descente, une échelle divisée en centimètres et en millimètres. La cloche avait été lestée de manière à demeurer bien verticale pendant sa chute. Dans toutes les expériences, on a observé la durée de la descente du gazomètre de $0^m,50$; et, pour éviter toute erreur sur le volume de gaz écoulé, on a jaugé la cloche dans l'étendue parcourue par le niveau de l'eau, en la renversant et la remplissant d'eau au moyen d'un vase dont la capacité était bien connue; ce volume a été trouvé égal à $0^{mc},1485$.

319. Le temps se comptait au moyen d'un compteur de Bréguet à pointage. Son mouvement était bien régulier, mais sa marche était un peu trop rapide; en le comparant avec un régulateur pendant deux heures, on a trouvé que le temps qu'il indiquait était égal à celui du régulateur multiplié par 1,008.

320. Les excès de pression de l'air dans la cloche se mesuraient ordinairement au moyen d'un manomètre à eau portant une échelle divisée en centimètres et en millimètres. Mais, pour obtenir une plus grande précision, je me suis souvent servi d'un manomètre à eau à tube incliné (*fig.* 7). Il se compose d'un vase A, ouvert, garni à la partie inférieure d'une tubulure dans laquelle est mastiqué un tube de verre *abc* de 1 mètre de longueur, de $0^m,005$ de diamètre, fixé contre une planche verticale, sur laquelle se trouve, dans la direction

du tube, une échelle BC divisée en centimètres et en millimètres. Cette planche est clouée sur une autre qui porte le vase A, et qu'on maintient horizontale au moyen de vis et du niveau d'eau D. Pour se servir de cet appareil, on fait communiquer l'extrémité *c*, au moyen d'un tube en caoutchouc, avec l'espace dont on veut mesurer l'excès

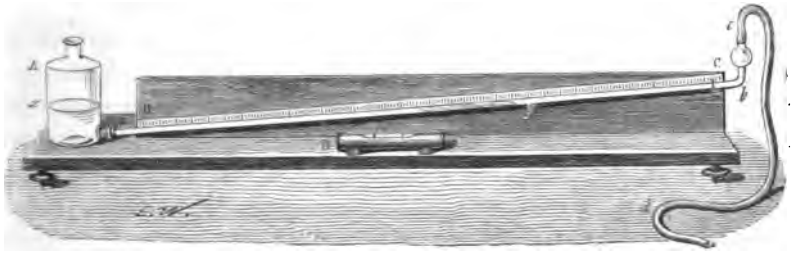


Fig. 7.

de pression sur celle de l'air extérieur. En comparant les indications de cet instrument avec celles d'un manomètre vertical, j'ai reconnu qu'il marchait très-régulièrement, que la colonne liquide déplacée revenait toujours exactement au point de départ, et qu'un millimètre de son échelle correspondait à $0^m,0000772$ de pression, ou à peu près à $\frac{1}{13}$ de millimètre.

321. Nous avons trouvé (309) une formule très-simple pour obtenir la vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé, quand on connaît la charge qu'il supporte, la pression extérieure et la température ; mais lorsqu'on fait un fréquent usage de cette formule et que l'excès de pression est très-faible, B diffère peu de *b*, et il est plus commode de transformer cette expression en une autre dans laquelle B—*b* est estimé en eau et *b* en mercure ; on a alors :

$$v = \frac{395}{\sqrt{13,59}}\sqrt{\frac{(B-b)(1+at)}{Bd}} = 107,16\sqrt{\frac{(B-b)(1+at)}{Bd}}.$$

322. Pendant la descente de la cloche, la pression intérieure B diminue toujours d'une certaine quantité par l'accroissement de la partie immergée. Il serait difficile de calculer la pression moyenne qui correspond au volume de gaz écoulé ; mais comme, pour la limite de chute qui n'a jamais été dépassée, et pour un excès de pression de $0^m,042$ qui a été généralement employé, la variation a été de $0^m,002$ d'eau, et que les vitesses correspondantes aux pressions extrêmes sont dans le rapport des nombres 205 et 200, on a supposé

que la vitesse moyenne correspondait à la pression moyenne.

323. La pression atmosphérique était mesurée à chaque expérience au moyen d'un baromètre de Fortin ; la hauteur observée n'a point été ramenée à 0°, parce que cette correction est insignifiante ; en effet, une hauteur de $0^m,76$, observée à 20° et ramenée à 0°, serait

$$0^m,76 \cdot \frac{5550}{5570} = 0^m,75727 ;$$

et comme les vitesses sont en raison inverse des racines carrées des pressions barométriques, et que les racines carrées des nombres 0,75727 et 0,76 sont 0,8717 et 0,8700, il s'ensuit que les vitesses varieraient, par la correction dont il s'agit, à peu près dans le rapport de 1 à 1,002.

324. Dans les expériences sur l'écoulement des gaz par des orifices en mince paroi ou par des tuyaux, il est de la plus grande importance de mesurer les diamètres des orifices avec une très-grande précision, attendu que les vitesses d'écoulement étant égales au volume de gaz écoulé en une seconde divisé par la surface de l'orifice, une très-petite erreur sur l'estimation des diamètres en produit une beaucoup plus grande sur la valeur de la surface, et par suite sur les vitesses. J'ai d'abord employé une machine à diviser ordinaire ; la vis faisait mouvoir une lunette renfermant un cheveu qu'on amenait successivement à être tangent aux deux bords de l'orifice ; chaque tour de la vis était une fraction connue de millimètre, et la vis était divisée en 200 parties égales. On obtenait ainsi une mesure très-exacte ; mais j'ai préféré employer la méthode plus simple que je vais indiquer. J'ai fait construire quatre règles en cuivre, de $0^m,50$ de longueur, divisées en millimètres ; les côtés étaient parfaitement en ligne droite, mais non parallèles, et les différences des largeurs extrêmes étaient de 5 millimètres ; il est évident qu'en introduisant une de ces règles dans un orifice, ayant un diamètre compris entre sa plus grande et sa plus petite largeur, jusqu'à ce que les côtés de la règle touchassent les bords de l'orifice, le diamètre de l'orifice était égal à $l + n(\mathrm{L} - l) : 500$, l et L représentant les largeurs de la règle et n le nombre de millimètres de la règle qui correspondait au contact. Les largeurs des règles ont été prises à la machine, mais elles ont été vérifiées par un procédé très-simple dont les résultats ont été tellement satisfaisants que je le préfère à tout autre. La longueur qu'il fallait mesurer a été prise avec un compas à vis de rappel terminé par des pointes très-fines, et l'ouverture de compas a

été portée un grand nombre de fois sur une ligne tracée sur une lame étroite de papier qu'on avait collée sur une règle de cuivre divisée en millimètres; on observait les longueurs correspondantes à un certain nombre de parties, lorsqu'elles coïncidaient à un nombre exact de millimètres, et on prenait la moyenne de tous les résultats; pour chaque longueur, le nombre des expériences a varié de 4 à 6, le nombre des parties de 20 à 70, et tous les résultats s'accordent à moins de un centième de millimètre; ils diffèrent d'ailleurs d'une très-petite quantité des résultats fournis par la machine. J'ai insisté sur cette méthode, parce qu'elle n'exige point de machine compliquée, et qu'il suffit d'un compas et d'un peu de soin.

325. Je n'ai pas fait d'expériences sur des orifices d'un diamètre supérieur à $0^m,01$, parce que, pour des orifices plus grands, la durée de l'écoulement du volume d'air que j'ai toujours employé était trop petite et ne pouvait pas être mesurée avec précision; je n'ai pas non plus opéré sur des orifices de diamètre inférieur à $0^m,002$, parce que leur mesure par une méthode quelconque ne pourrait pas avoir l'exactitude nécessaire.

326. Je n'ai pas tenu compte de l'état hygrométrique de l'air enfermé dans la cloche; en le supposant saturé, pour la température la plus élevée qui a été d'environ 20°, l'influence de la vapeur d'eau ne diminue la densité de l'air que d'à peu près 5 dix-millièmes.

327. Les vitesses effectives ont été calculées au moyen de la formule

$$v = \frac{0,1485}{S \cdot \theta},$$

$0^m,1485$ représentant le volume de gaz écoulé, qui a toujours été le même, S la section de l'orifice d'écoulement, et θ la durée de l'écoulement en secondes.

328. La valeur de v sera obtenue avec d'autant plus de précision que S sera plus petit, car θ augmente à mesure que S diminue, et le temps peut très-facilement se mesurer à moins d'une seconde.

Les expériences ont toutes été répétées deux fois et les résultats n'ont été admis qu'autant qu'ils concordaient parfaitement. On s'assurait chaque fois que le gazomètre ne perdait pas.

Dans toutes ces recherches, j'ai été très-bien secondé par M. Daniel, professeur de physique à l'École centrale.

329. Il résulte de ces expériences qui ont été rapportées en détail dans les notes placées à la fin de la précédente édition de cet ou-

vrage, que le coefficient de correction, pour des orifices en mince paroi placés sur une surface d'une grande étendue et pour de faibles pressions, est très-voisin de 0,65 et qu'il est sensiblement le même pour des orifices circulaires et rectangulaires, quels que soient le rayon du cercle et le rapport des côtés. La valeur du coefficient de correction résultant de ces nouvelles expériences est exactement celui qui a été trouvé par d'Aubuisson.

330. *Perte de charge dans l'écoulement des gaz par un orifice en mince paroi.* — Nous avons vu (311) que, dans l'écoulement des gaz, le volume est donné par la formule

$$Q = \varphi S\sqrt{2gP},$$

en appelant Q le volume écoulé par seconde, φ le coefficient de correction, S la section de l'orifice et P l'excès de la pression dans le réservoir sur celle du milieu dans lequel le gaz s'écoule, cette pression étant évaluée en hauteur de gaz comprimé. Bien que φ affecte probablement la section, tout se passe, sous le rapport de la dépense, comme s'il affectait la charge ; et, en appelant v la vitesse moyenne dans la section S, on a évidemment $Q = vS$, d'où $v^2 = 2gP\varphi^2$. Si p est la charge correspondante à la vitesse v, on a aussi $v = \sqrt{2gp}$, et il en résulte que

$$p = \varphi^2 P \quad \text{et} \quad P - p = p\left(\frac{1}{\varphi^2} - 1\right) = Ap$$

en posant $A = \dfrac{1}{\varphi^2} - 1$.

La différence $P - p$, qu'on désigne sous le nom de *perte de charge*, se trouve ainsi exprimée en fonction de la charge correspondante à la vitesse moyenne d'écoulement et du coefficient de correction.

Pour un orifice en mince paroi, sous une faible pression, on a $\varphi = 0{,}65$, comme nous venons de le voir ; il en résulte

$$P - p = 1{,}366p, \quad \text{et} \quad A = 1{,}366.$$

331. *Influence d'une surface intérieure parallèle au plan de l'orifice.* — D'après les expériences indiquées plus haut, l'influence d'une plaque parallèle à l'orifice et plus ou moins rapprochée est nulle, du moins tant que cette distance excède $0^m{,}01$ et pour un orifice de $0^m{,}006$ de diamètre.

332. *Influence des surfaces extérieures perpendiculaires au plan de l'orifice.* — Si on dispose des plaques sur les côtés d'un orifice

rectangulaire en mince paroi et perpendiculairement à la surface, on observe que la vitesse augmente avec le nombre de plaques, et le coefficient de correction 0,65 peut devenir égal à 0,728, quand les trois côtés de l'orifice sont garnis de plaques.

333. *Influence de la nature de la surface sur laquelle l'orifice est percé.* — L'air arrivant vers l'orifice dans toutes les directions, on pouvait supposer que le frottement contre la surface de la plaque pouvait avoir de l'influence sur le coefficient de correction et qu'il pouvait varier avec la nature de la surface. Il résulte des expériences que l'influence de la surface est très-faible et probablement nulle.

334. *Orifice en mince paroi placé à l'extrémité d'un tuyau dont le diamètre est comparable à celui de l'orifice* (*fig.* 8). — Nous venons de voir que, lorsqu'un orifice en mince paroi est placé à l'extrémité d'un tuyau ayant une très-grande section relativement à la surface de l'orifice, le coefficient de contraction pour de faibles excès de pression est égal à 0,65 et le coefficient de perte de charge A = 1,366. Mais quand les diamètres sont comparables, la valeur de φ n'est plus la même, et il semble qu'elle doive augmenter à mesure que la section de l'orifice augmente, puisque le coefficient doit devenir égal à l'unité quand le diamètre de l'orifice est égal au diamètre du tuyau.

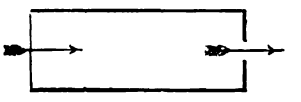


Fig. 8.

Il résulte cependant de l'expérience qu'en désignant par D et d les diamètres du tuyau et de l'orifice, on a, pour les différentes valeurs de d : D, les valeurs de φ et de $A = \frac{1}{\varphi^2} - 1$ renfermées dans le tableau suivant :

Rapports d : D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Valeurs de φ	0,65	0,62	0,64	0,66	0,67	0,68	0,74	0,80	0,87	1
Valeurs de A	1,366	1,60	1,44	1,30	1,23	1,16	0,83	0,56	0,32	0

On voit à l'inspection de ces nombres, qu'il y a un minimum de φ pour d : D = 0,2 ; toutes les expériences tendent à le constater.

335. *Mesure de la densité du gaz d'éclairage dans les usines.* — La formule (B) (n° 309), qui représente la vitesse d'écoulement des gaz comprimés, conduit à une méthode très-simple et très-exacte pour déterminer la densité du gaz d'éclairage. Dans les usines à gaz, la mesure dont il s'agit est d'un grand intérêt ; d'abord parce que les volumes de gaz produits dans le même temps, ainsi que leurs den-

sités et leurs pouvoirs éclairants, diminuent progressivement pendant la durée de l'opération, tandis que la consommation de combustible est constante ; il y a donc avantage à arrêter la distillation de la houille à un certain moment. De plus, la densité moyenne du gaz obtenu permet d'apprécier la valeur de la houille sous le rapport de la production des gaz ; enfin la mesure de la densité d'un même gaz à différentes époques après sa fabrication, densité qui est variable à cause de la condensation des vapeurs combustibles que le gaz renferme, est encore un élément important dans la direction de l'établissement.

336. La méthode dont nous voulons parler consiste à remplir de gaz un petit gazomètre, et à mesurer la durée de l'écoulement d'un certain volume sous une certaine pression. En désignant par Q le volume écoulé en mètres cubes, par θ la durée de l'écoulement en secondes, par v la vitesse, par S la section de l'orifice en mince paroi, par φ le coefficient de contraction, par B et b la pression totale que supporte le gaz et la pression de l'air extérieur, par t la température, et par δ la densité tabulaire du gaz, on a

$$Q = \varphi \,.\, S \,.\, v \,.\, \theta \,. = \varphi S \,.\, \theta \,.\, 395 \sqrt{\frac{(B - b)}{B} \frac{(1 + at)}{\delta}},$$

équation qui donne

$$\delta = \frac{\varphi^2 S^2 (395)^2}{V^2} \,.\, \theta^2 \,.\, \frac{(B - b(\,(1 + at)}{B} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

En supposant que le volume de gaz écoulé, l'orifice d'écoulement et l'excès de pression soient toujours les mêmes, la valeur de δ deviendrait

$$\delta = K \,.\, \theta^2 \,.\, \frac{1 + at}{B} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

K étant un nombre constant ; et par conséquent δ serait sensiblement proportionnel au carré du temps de l'écoulement, le rapport $1 + at$: B variant fort peu.

Ainsi, en supposant que l'excès de pression soit de $0^m,10$ d'eau, que la hauteur du baromètre soit de $0^m,76$, et la température de 0°, on trouve $(1 + at) : B = 0,0958$. En prenant les circonstances extérieures les plus défavorables, $t = 20°$ et $t = -10°$, et pour les hauteurs du baromètre $0^m,74$ et $0^m,78$, on trouve pour les valeurs de $(1 + at)$: B, les nombres 0,1055 et 0,09335, qui diffèrent de

moins de un centième de celui qui résulte des premières suppositions. Ainsi, on peut admettre, pour le rapport $(1 + at) : B$, la valeur 0,0958.

337. Pour faire voir comment les temps des écoulements varient avec la densité du gaz, nous supposerons que l'excès de pression soit de $0^m,10$ en eau, que le volume écoulé soit de 1 mètre cube, et que l'orifice d'écoulement en mince paroi ait $0^m,01$ de diamètre.

En prenant 0,0958 pour la valeur de $(1 + at) : B$, on trouve que pour des gaz dont les densités sont :

1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

les durées des écoulements sont

507″	480″	453″	424″	392″	358″	320″	277″	226″	160″

On voit, d'après ces nombres, qu'une très-petite différence de densité peut facilement être constatée par expérience, car on peut observer le temps de l'écoulement à moins d'une seconde. On pourrait rendre les différences encore plus grandes, en augmentant le volume de gaz écoulé, ou en diminuant le diamètre de l'orifice.

338. Comme il est difficile de mesurer avec une grande précision le diamètre d'un petit orifice, on pourrait déterminer par expérience la valeur de K de l'équation (2), en remplissant le gazomètre d'air et en mesurant la durée de l'écoulement du volume convenu sous la pression adoptée. Cette méthode conduirait à un résultat certainement plus exact que la mesure directe du diamètre.

On pourrait éviter tous les calculs préliminaires, en opérant chaque fois sur l'air et sur le gaz dans les mêmes circonstances ; les densités seraient exactement proportionnelles aux carrés des durées des écoulements.

339. Si on voulait se dispenser de faire la double expérience et obtenir une plus grande précision en ayant égard au facteur $(1 + at) : B$, on pourrait calculer d'avance la valeur de cette expression, pour les températures et les hauteurs du baromètre comprises entre les limites extrêmes pour le lieu où l'on opère, et disposer les résultats dans une table à deux entrées qui donnerait immédiatement la valeur du facteur en question, dans les différents cas qui peuvent se présenter. Il suffirait de faire varier la température de 5° en 5°, et la pression barométrique de 5 millimètres en 5 millimètres.

340. On pourrait aussi disposer un appareil qui indiquerait à cha-

que instant la densité du gaz. L'appareil consisterait en une caisse de tôle (*fig.* 9), ayant une face latérale vitrée, qu'on pourrait facilement remplir de gaz au moyen de deux tuyaux garnis de robinets hydrauliques et communiquant avec le tuyau de conduite des épurateurs au gazomètre. Elle renfermerait un ballon de cuivre très-mince de 0^{m},30 à 0^{m},40 de diamètre, fermé, plein d'air, et suspendu à l'extrémité d'un levier mobile autour d'un axe horizontal, qui porterait au delà

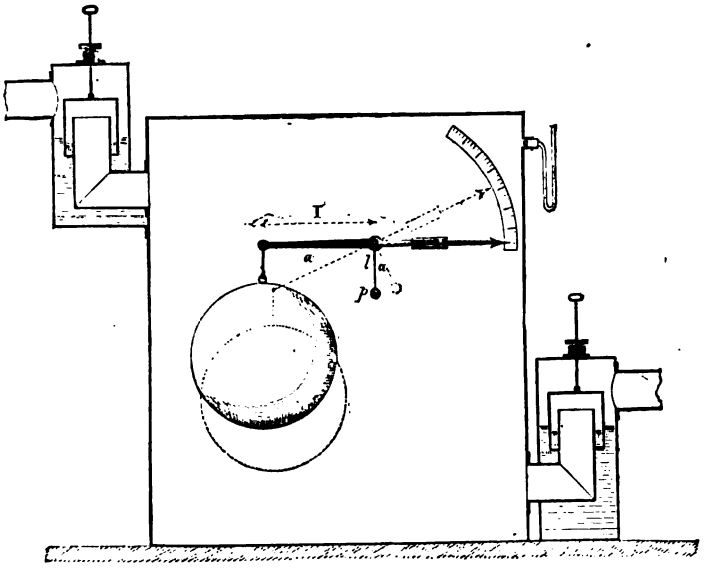


Fig. 9.

du point de rotation un poids faisant équilibre à celui de la sphère dans l'air, et qui se terminerait par une aiguille parcourant un cadran divisé ; un petit poids placé au-dessous de l'axe de rotation et fixé au levier, serait destiné à maintenir l'équilibre sous différentes inclinaisons. L'appareil, horizontal dans l'air, s'inclinerait d'autant plus que le gaz dans lequel il serait plongé aurait une plus faible densité. En désignant par L la longueur du levier de la balance, par l la distance du poids p à l'axe de rotation, par P et P′ les poids des volumes d'air et de gaz égaux au volume de la sphère dans les mêmes circonstances de température et de pression, on aura évidemment

$$(P - P')L = lp \operatorname{tang} \alpha ; \quad \text{ou} \quad \frac{P'}{P} = d = 1 - \frac{lp}{LP} \operatorname{tang} \alpha .$$

En supposant que le ballon ait 0^{m},40 de diamètre, on aurait

$P = 0^{kil},043$; et si on suppose $lp = LP$, l'équation précédente devient

$$d = 1 - \text{tang } \alpha.$$

La relation $lp = LP$ peut être satisfaite en prenant $l = 0,1L$ et $p = 4^g\,3$, et on trouve facilement que pour des inclinaisons de

5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°

les densités du gaz sont

0,91	0,82	0,72	0,63	0,52	0,42	0,28	0,16

Ainsi l'appareil aurait une sensibilité suffisante. Mais il faudrait qu'il fût construit avec beaucoup de soin, que le poids du ballon fût le plus petit possible, et que l'axe de rotation n'eût qu'un petit diamètre.

On pourrait aussi disposer l'appareil de manière que la distance horizontale du point de suspension à la verticale du point de rotation restât constante; alors *tang* α serait remplacée par *sin* α; cette disposition serait avantageuse si on voulait mesurer des densités très-petites, parce que les variations d'inclinaisons correspondraient à de plus petites variations de densités, et que la limite d'inclinaison, qui est de 45° pour le cas que nous avons examiné, serait de 90° dans le cas dont il est question; mais l'appareil serait un peu plus compliqué.

341. Les calculs que nous avons indiqués ne sont pas parfaitement exacts, parce que la valeur de B, que nous avons supposée constante dans le second terme de la valeur de d, est réellement variable, et devrait être calculée pour la température et la pression que supporte le gaz; mais ces variations sont toujours très-petites et négligeables dans les circonstances ordinaires; car une variation de 2 centimètres dans la hauteur du baromètre, jointe à une variation de température de 20°, ne produirait qu'une variation de 0,05 dans le poids du même volume d'air. Le seul inconvénient réel que pourrait présenter l'appareil se trouverait dans les dépôts des vapeurs en suspension dans le gaz, qui augmenteraient le poids du ballon et pourraient accroître le frottement de l'axe de rotation; mais on éviterait ces dépôts en ne laissant pas séjourner les gaz dans l'appareil, et pour cela, il faudrait le remplir d'air après chaque opération.

342. On pourrait aussi employer la disposition suivante. A côté du gazomètre se trouverait un tube vertical de 3 à 4 mètres de hauteur, de

quelques centimètres de diamètre, communiquant par le bas avec le gazomètre au moyen d'un tube garni d'un robinet. Le tube est recourbé à sa partie supérieure de façon à empêcher la sortie du gaz quand le robinet supérieur est fermé; la partie inférieure communique avec un manomètre à tube incliné. Pour mesurer la densité, on fait écouler le gaz pendant quelques instants, puis on ferme le robinet et on observe le manomètre; la différence observée serait égale à $H(1-\delta)\,0{,}0013$, H étant la hauteur du tube et δ la densité du gaz par rapport à l'air. En supposant $H = 10^m$, $\delta = 0{,}4$ la différence des niveaux dans le manomètre serait égale à $0^m{,}0078$; elle serait de $7^{cm}{,}8$ si l'on employait un manomètre à tube incliné décuplant la pression réelle.

CHAPITRE II

Écoulement des gaz sous de grandes pressions par un orifice en mince paroi.

343. Tout ce que nous avons dit jusqu'ici suppose nécessairement que la charge qui produit l'écoulement est très-petite, qu'elle est inférieure à un centième d'atmosphère. Quand les pressions sont considérables, comme les gaz sont très-compressibles, et qu'ils peuvent éprouver de grandes variations de température par les changements de volume, on ne peut pas admettre, *à priori*, que les résultats obtenus pour de faibles charges seront les mêmes pour les grandes pressions.

Les plus anciens travaux sur l'écoulement des gaz par de grandes pressions sont dus à MM. Wantzel et Saint-Venant; plus tard, M. Poncelet a fait sur ce sujet des expériences d'un grand intérêt; nous donnerons d'abord un résumé suffisamment étendu de ces recherches.

344. *Expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant.* — Ces expériences, faites en 1839, ont été publiées dans le *Journal de l'École polytechnique* (27e cahier). La méthode d'observation employée par ces habiles ingénieurs consistait à faire le vide dans une cloche de verre ayant à peu près 18 litres de capacité, et fermée à la partie supérieure par une plaque percée d'un orifice. On débouchait l'orifice pendant un certain temps; et, connaissant les pressions et les températures en dedans et en dehors, ainsi que la capacité de la cloche,

on pouvait facilement calculer le volume d'air qui avait pénétré dans l'intérieur. La vitesse d'entrée de l'air variait à chaque instant, et il a fallu chercher par tâtonnement, pour la valeur de cette vitesse, une expression telle que, par l'intégration de vdt dans les limites correspondantes à la durée de l'expérience, on retrouvât le même volume que par l'observation directe. Les précautions les plus minutieuses ont été prises pour déterminer, le plus exactement possible, le volume de la cloche, les pressions et les températures intérieures et extérieures, et les dimensions des orifices. On a opéré sur des orifices en mince paroi ayant $0^m,0085$, $0^m,009$, $0^m,011$ de diamètre.

345. D'après ces expériences, les vitesses d'écoulement par des orifices en mince paroi sont représentées par la formule empirique

$$v = 241\,(1+at)^{\frac{1}{2}}\,\frac{\left(\frac{h-h'}{h}\right)^{\frac{1}{2}}}{1+0{,}53\left(\frac{h-h'}{h}\right)^{\frac{1}{2}}},$$

dans laquelle a est le coefficient de dilatation du gaz, t sa température, h et h' les pressions intérieure et extérieure, estimées d'une manière quelconque, et v la vitesse du gaz comprimé.

346. Pour découvrir la loi de l'écoulement renfermée dans cette formule, posons $t = 0$, et cherchons les vitesses correspondantes à des excès de pression en atmosphères de

0,01 0,1 0,5 1,0 5 10 100 ∞.

En substituant dans la formule pour $(h-h') : h$ les valeurs correspondantes, on trouve pour les vitesses :

$23^m,36$ $72^m,05$ $122^m,83$ $141^m,17$ $149^m,31$ $151^m,06$ $152^m,09$ $152^m,47$; (*a*)

et comme les vitesses correspondantes à ces charges, d'après la formule $v = \sqrt{2\,g\,H}$, sont

$38^m,30$ $119^m,10$ $227^m,91$ $279^m,26$ $353^m,13$ $373^m,46$ $393^m,02$ 395^m, (*b*)

les rapports des premières vitesses aux dernières sont :

0,61 0,605 0,539 0,506 0,423 0,405 0,387 0,386 (*c*).

347. Ainsi, d'après les expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant, l'air comprimé s'écoule comme un liquide de même densité; seulement le coefficient de correction diminue progressivement, à

mesure que la pression augmente. On voit à l'inspection des nombres (*a*) qu'à partir d'un excès de pression de 5 atmosphères jusqu'à l'infini, la vitesse d'écoulement est sensiblement constante, car elle ne varie que de 149 à 152. Ce résultat, qui paraît singulier au premier abord, provient de la diminution progressive du coefficient de contraction. Il est important de remarquer que, pour que les variations de ce coefficient compensent les accroissements de vitesse, il suffit que de 2 atmosphères à l'infini il décroisse dans le rapport de 14 à 10 ; car, pour ces excès de pression, la vitesse d'écoulement due à la pression varie de $(0,5)^{\frac{1}{2}}$ à 1, c'est-à-dire de 0,7071 à 1, ou de 1 à 1,41.

348. Dans les différentes séries d'expériences faites par MM. Saint-Venant et Wantzel sur l'écoulement de l'air par des orifices en mince paroi, les diamètres des orifices étaient très-petits; une évaluation suffisamment approchée de leur diamètre était assez difficile; mais une erreur sur cette évaluation affectait dans le même rapport toutes les vitesses, et, par conséquent, il paraît difficile de ne pas admettre le fait principal qui résulte de ces expériences, savoir, un décroissement progressif du coefficient de contraction qui, à partir d'un excès de pression de 2 atmosphères, rend la vitesse sensiblement constante jusqu'aux plus grands excès de pression. D'ailleurs, les expériences de M. Poncelet, dont nous allons parler, confirment complétement la diminution du coefficient de correction à mesure que la pression augmente.

349. Les travaux de MM. Wantzel et Saint-Venant datent, comme nous l'avons dit, de 1839; en 1843, les mêmes ingénieurs ont fait des expériences sur le même sujet, mais dans d'autres conditions. Dans les premières recherches, les pressions ont varié dans des limites très-étendues, mais les diamètres des orifices ont été compris entre $0^m,0085$ et $0^m,011$, et la pression d'amont a toujours été celle de l'atmosphère. Dans les nouvelles expériences, l'écoulement a eu lieu dans l'air sous des pressions qui se sont élevées jusqu'à 4 atmosphères, par des orifices de $0^m,00212$, $0^m,003285$ et $0^m,004985$, l'air sortant d'un réservoir ayant $1^m,3186$ de capacité. Les nouveaux résultats s'accordent d'une manière satisfaisante avec ceux de 1839.

350. Dans toutes leurs expériences, MM. Wantzel et Saint-Venant calculaient les vitesses d'écoulement en divisant le volume de gaz écoulé en une seconde par la section de l'orifice. Il n'est pas douteux que, si les sections des orifices avaient été mesurées avec la plus

grande précision, on aurait dû trouver, pour de très-faibles pressions, le coefficient 0,65 obtenu par d'Aubuisson, et qui résulte de mes nombreuses expériences; ainsi, il y a eu, pour l'estimation des diamètres, une erreur qui a affecté proportionnellement toutes les autres expériences, et par conséquent la formule donne des vitesses trop petites dans le rapport de 61 à 65. En multipliant la valeur générale de v par 65 : 61 ou 1,065, elle satisfait complétement aux observations faites sous de faibles pressions, et il est très-probable qu'elle s'approche plus de la vérité que la formule primitive. Il est important de remarquer que l'erreur dont il est question est de 0,065 sur la section, et à peu près de 3 centièmes sur le diamètre, ce qui correspond, pour un diamètre de 2 millimètres, à 6 centièmes de millimètre, quantité très-petite, et qui très-probablement était comprise dans les limites d'erreur des mesures directes des diamètres.

En multipliant les nombres (c) par 1,065, on trouve :

0,65 0,64 0,57 0,54 0,45 0,431 0,423 0,411 (d).

351. Ainsi, il résulte des nombreuses expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant, que l'air sous la pression de l'atmosphère s'écoule, dans un espace où l'air est plus ou moins dilaté, comme un liquide de même densité; seulement, le coefficient de contraction diminue progressivement de 0,65 à 0,411, quand l'excès de pression décroît de 1 atmosphère à 0; et on doit regarder comme très-probable qu'il en serait de même d'un gaz comprimé qui s'écoulerait dans un lieu occupé par un gaz ayant une tension quelconque.

352. *Expériences de M. Poncelet.* — On doit à M. Poncelet des expériences importantes sur l'écoulement de l'air par des orifices en mince paroi et par de courts ajutages, sous une grande pression (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. XXI, p. 197). Elles ont été faites au moyen d'un appareil disposé par MM. Pecqueur et Zambeaux, pour observer l'écoulement de l'air par de longs tuyaux de conduite.

353. Cet appareil était composé d'une chaudière à vapeur ayant $2^{m.c.}$,926 de capacité, dans laquelle l'air avait été comprimé à plusieurs atmosphères au moyen d'une pompe mise en mouvement par une machine à vapeur; ce magasin d'air comprimé communiquait avec un réservoir de tôle ayant 180 litres de capacité, au moyen d'un tube de 0^{m},80 de longueur et de 0^{m},04 de diamètre intérieur, muni d'un robinet. Ce dernier réservoir communiquait avec un manomètre, et sa surface était percée d'un orifice par lequel l'air devait se dégager ;

on y maintenait une pression constante en tournant plus ou moins la clef du robinet du tuyau de communication avec le grand réservoir; et à la fin de l'expérience, on calculait le volume d'air écoulé, au moyen du volume du grand réservoir et de la diminution de pression que l'air y avait éprouvée.

354. M. Poncelet a trouvé que, pour des orifices en mince paroi de $0^m,01028$ et $0^m,0145$, et sous un excès de pression constant d'une atmosphère, le coefficient de correction de la vitesse d'écoulement du gaz comprimé était 0,563 et 0,566, en moyenne 0,564.

Mais M. Poncelet regarde le coefficient 0,564, obtenu par les expériences, comme ayant été modifié par les variations de température provenant de la détente du gaz dans le grand réservoir et de son échauffement dans le second; et, par un calcul approximatif, en n'ayant égard qu'au premier effet, évidemment beaucoup plus grand que le second, il pense que le coefficient devrait être réduit à 0,53; ainsi, ce coefficient serait compris entre 0,56 et 0,53. D'après les expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant, il serait de 0,506, et d'après la formule modifiée de manière à donner, pour les faibles pressions, le coefficient 0,65, celui qui correspond à un excès de pression d'une atmosphère serait de 0,54, nombre bien voisin de celui qui a été obtenu par M. Poncelet.

355. M. Poncelet conclut de ses expériences que les gaz, dans leur écoulement à travers des orifices et entre des limites très-étendues de pression, se comportent comme des fluides incompressibles.

356. Il est possible de mettre la formule, qui donne la vitesse d'écoulement des gaz permanents, sous une forme très-simple renfermant les variations de φ. Pour un excès de pression très-faible et pour un excès de pression d'une atmosphère, les vitesses d'écoulement sont :

$$v = \sqrt{2gh(0,65)^2}; \quad \text{et} \quad v' = \sqrt{2gh'(054)^2}.$$

Alors, pour un excès de charge $\frac{P-p}{P}$ égal à 0,5, la diminution de la valeur de h est $(0,66)^2-(0,54)^2=0,1309$; si on admet que cette perte soit proportionnelle à la charge, elle sera $2.0,1309.\frac{P-p}{P}$ ou $0,2618\,\frac{P-p}{P}$; et la formule deviendra

$$v=\sqrt{2gh\left(0,4225-0,2618\,\frac{P-p}{P}\right)}.$$

D'après cette formule, pour les excès de pression en atmosphères de

0,01	0,1	0,5	1	5	10	190	∞

les coefficients de correction seraient :

0,648	0,631	0,579	0,54	0,4521	0,429	0,404	0,401

nombres bien rapprochés de ceux que nous avons déduits de la formule modifiée (352).

Dans la pratique il sera plus simple de calculer les coefficients de correction en supposant qu'ils varient uniformément entre les pressions pour lesquelles ils ont été calculés (352).

CHAPITRE III

Examen de la formule de M. Navier.

357. M. Navier (*Résumé des leçons données à l'École des ponts et chaussées*) a donné, pour les gaz comprimés s'écoulant par de petits orifices, une formule déduite de l'hypothèse que le gaz se détend complétement dans le vase avant de sortir, et que cette détente a lieu sans refroidissement. Cette formule étant admise par un certain nombre d'ingénieurs, j'ai pensé qu'il était utile d'examiner jusqu'à quel point elle s'accorde avec l'expérience. La formule de M. Navier revient à celle-ci :

$$v^2 = 2g\left(2{,}3026 \cdot \frac{7955(1+at)}{\delta}\right) \log \frac{B}{b} = 600 \frac{1+at}{\delta} \log \frac{B}{b}$$

Le nombre 2,3026 est le module de tables de logarithmes; 7955, la pression ordinaire de l'atmosphère en air à 0°; δ, la densité tabulaire du gaz; et B et b les pressions intérieure et extérieure, estimées d'une manière quelconque. Mais comme cette formule est relative au gaz supposé complétement détendu, la vitesse relative au gaz sous la pression B sera évidemment donnée par la formule

$$v^2 = 600 \frac{1+at}{\delta} \cdot \frac{b^2}{B^2} \log \frac{B}{b} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

La formule qui résulte des expériences que nous avons rapportées est

$$v = \varphi \cdot 395 \sqrt{\frac{B-b}{B} \cdot \frac{(1+at)}{\delta}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

358. Pour comparer les résultats de ces deux formules, nous supposerons que les excès de pression soient successivement en atmosphères de

0,01 0,1 0,5 1 5 10 100 ∞

Pour ces excès de pression, la formule (2), en faisant abstraction de φ et en supposant $\delta = 1$, donne pour v :

$39^m,30$ 119^m 228^m 279^m 360^m 376^m 393^m 395^m (*a*)

nombres qui devraient être multipliés par un coefficient décroissant d'une manière continue de 0,65 à 0,411.

Pour obtenir les vitesses correspondantes aux mêmes pressions par la formule (1), il faut remarquer que, quand on fait $B - b = mb$, il vient $\frac{B}{b} = 1 + m$: ainsi il faudra dans la formule (1) donner successivement à $\frac{B}{b}$ les valeurs

1,01 1,1 1,5 2,0 6 11 101 1001 ∞

Les vitesses deviennent alors :

$38^m,95$ 111^m 168^m $164^m,5$ $88^m,2$ $54^m,54$ $8^m,4$ $0^m,031$ 0 (*b*)

359. En comparant les nombres (*b*) avec les nombres (*a*), on voit que la formule (1) est dans le désaccord le plus complet avec l'expérience. D'après cette formule, il y aurait un maximum pour une valeur de B : b comprise entre 1,5 et 2, et qui, d'après le calcul, aurait lieu pour $B : b = 1,64$. Or, MM. Wantzel et Saint-Venant affirment positivement que ce maximum n'existe pas. A partir de $B : b = 164$, la vitesse irait en décroissant d'une manière continue, et rien de pareil n'a jamais été observé, ni pour l'air ni pour la vapeur; on a toujours constaté que la vitesse augmente avec la pression, à la vérité très-lentement au delà d'une certaine limite, mais qu'il n'y a jamais de diminution.

360. Ainsi, la formule de M. Navier doit être complétement abandonnée. C'est, du reste, l'opinion de tous les ingénieurs qui ont fait des expériences sur le mouvement des gaz, et notamment de M. Poncelet. Dans le rapport de ce savant académicien sur les expériences de M. Pecqueur, se trouve le passage suivant : « M. Navier, dans un mémoire déjà cité, est parvenu à une série de remarquables formules, en se fondant sur l'hypothèse que, pendant l'écoulement, les gaz se

détendent exactement en suivant la loi de Mariotte ; ce qui revient à supposer que le rayonnement des parois et la chaleur qu'elles reçoivent des corps environnants maintiennent ces gaz à une température à très-peu près constante. MM. Saint-Venant et Wantzel ont déjà démontré dans un intéressant mémoire, en s'appuyant sur les résultats de leurs propres expériences, que les formules de M. Navier, outre qu'elles conduisent à quelques difficultés d'interprétation, n'étaient point conformes aux effets naturels, lors de fortes différences de pression. » Plus loin, M. Poncelet fait voir que, pour appliquer la formule de M. Navier à ses expériences, il faudrait admettre un coefficient de contraction compris entre $1{,}7.0{,}53 = 0{,}90$ et $1{,}7.0{,}56 = 0{,}96$, au lieu des nombres 0,53 et 0,56 trouvés par l'expérience.

361. MM. Saint-Venant et Wantzel ont une opinion aussi nette sur la formule de M. Navier. « Nous avons prouvé, disent-ils, qu'il fallait renoncer pour l'écoulement des gaz à la formule connue..... Cette formule donne en effet un écoulement maximum pour $b = 0{,}6065$ B, et un écoulement nul pour $b = 0$, c'est-à-dire quand l'espace d'aval est vide ; et nos expériences ont prouvé que ces deux résultats singuliers n'ont pas plus de réalité qu'ils n'avaient de probabilité. Nous avons reconnu que l'hypothèse sur laquelle cette formule se fonde, et qui consiste à supposer la même pression dans la veine d'écoulement et dans l'espace d'aval, est fausse ; la pression dans l'orifice est intermédiaire entre celles de B et de b des deux espaces, et ne descend probablement jamais au-dessous des $3/5$ de la pression d'amont B » (*Comptes rendus*, t. XVII, p. 1140).

362. Indépendamment de l'hypothèse de la détente complète, qui est en opposition avec l'expérience, M. Navier a fait une autre supposition aussi inadmissible ; il a admis que les gaz se détendent sans se refroidir, ou du moins que ce refroidissement est négligeable.

363. En supposant que le gaz qui s'écoule ne reçoive aucune quantité de chaleur et n'en abandonne aucune, on aura pour représenter les variations de volume, de température et de pression subies par une masse déterminée de gaz, les formules.

$$\frac{p}{p'} = \left(\frac{V'}{V}\right)^k ; \quad \frac{273 + t}{273 + t'} = \left(\frac{p}{p'}\right)^{\frac{k-1}{k}} ; \quad \frac{273 + t}{273 + t'} = \left(\frac{V'}{V}\right)^{k-1} .$$

Dans ces formules, t, v et p représentent la température, le volume et la pression du gaz dans son état initial et p', v' et t', les valeurs correspondantes dans l'état final du gaz ; K est le rapport des deux

capacités calorifiques du gaz à pression constante et à volume constant : ce rapport est égal à 1,41 pour l'air et les gaz simples ; on remarquera que deux quelconques de ces formules peuvent se déduire de la troisième en combinant celle-ci avec la relation $\frac{vp}{273+t} = \frac{v'p'}{273+t'}$ qui exprime la loi de Mariotte et celle de Gay-Lussac.

Ces formules servent également lorsqu'il s'agit d'une compression ou d'une détente du gaz.

Ces formules, présentées d'abord par Laplace, ont été ensuite établies très-nettement par Poisson , dont elles ont retenu le nom.

364. En appliquant les principes relatifs à la théorie mécanique de la chaleur, on est arrivé pour exprimer les conditions de l'écoulement des gaz, à des formules nouvelles qu'il est important de connaître :

Considérons une tranche infiniment mince d'un gaz qui se meut dans un canal à section variable,

Soit S la section de la tranche considérée,

Soit u la vitesse du gaz qui la traverse,

Soit P le poids du gaz qui passe en une seconde à travers la tranche,

Soit t la température de cette tranche,

Soit p la pression du gaz dans cette tranche,

Soit v le volume de l'unité de poids du gaz à la température t et sous la pression p,

Soit A l'équivalent calorifique du travail, égal à $\frac{1}{424}$.

Écrivons l'équation des forces vives pour cette tranche : la quantité de gaz qui traverse en un temps θ la tranche considérée sera $P\theta$ et sa force vive extérieure sera $\frac{P\theta u^2}{2g}$; la force vive interne de cette même masse sera :

$$\frac{P\theta C_1(273+t)}{A}$$

C_1 étant la capacité calorifique du gaz à volume constant ; la force vive totale sera donc :

$$F\theta\left[\frac{u^2}{2g} + C_1\frac{(273+t)}{A}\right]$$

et l'accroissement infiniment petit de la force vive deviendra :

$$P\theta\left[\frac{udu}{g}+\frac{C_1dt}{A}\right]$$

d'un autre côté, la pression en amont de la tranche étant p, et la vitesse u, la pression en aval sera $p+dp$ et la vitesse $u+du$, la somme des travaux des deux pressions sera exprimée par :

$$-d(Spu)\theta;$$

mais on a nécessairement :

$$Su = Pv;$$

on a d'ailleurs la relation :

$$pv = R(273+t) \qquad (1)$$

qui exprime la loi de Mariotte et la loi de Gay-Lussac ; enfin, en partant de l'équivalence de la chaleur et du travail, on trouve :

$$AR = C - C_1 \qquad (2),$$

ces trois dernières relations donnent :

$$Spu = PR(273+t) = \frac{P(C-C_1)}{A}(273+t),$$

d'où enfin

$$-d(Spu)\theta = -P\theta\frac{C-C_1}{A}dt.$$

Si nous représentons par N la quantité de chaleur qui se perd à travers la paroi pendant le temps θ ; le travail correspondant sera $-\frac{N}{A}$,

et si enfin M représente le travail de la pesanteur, l'équation des forces vives sera :

$$P\theta\left[\frac{udu}{g}+\frac{C_1dt}{A}\right] = -P\theta\frac{C-C_1}{A}dt - \frac{N}{A}+M,$$

et si nous négligeons le travail dû à la pesanteur, si de plus nous supposons qu'il n'y a ni chaleur perdue, ni chaleur gagnée par le gaz, nous obtenons :

$$\frac{udu}{g}+\frac{C_1dt}{A} = -\frac{C-C_1}{A}dt$$

et en intégrant :

$$\frac{u^2 - u_0^2}{2g} = -\frac{C_1}{A}(t - t_0) - \frac{C - C_1}{A}(t - t_0) \qquad (\alpha).$$

365. Supposons un récipient contenant un gaz comprimé et soient p_0, t_0 la pression et la température du gaz dans ce récipient ; nous admettons que ces quantités restent constantes pendant toute la durée de l'écoulement. Le récipient est muni d'un orifice en mince paroi de surface S par lequel le gaz s'écoule dans le milieu ambiant dont la pression et la température, supposées toutes deux constantes, sont respectivement p et t ; soient de plus t' et p_0, la température et la pression à l'orifice d'écoulement ; appliquons l'équation (α) au cas qui nous occupe.

La vitesse du gaz étant nulle dans le récipient, nous devrons poser $u_0 = o$; on devra aussi remplacer t par t'.

D'autre part nous pourrons transformer les termes du second membre ; en effet, les équations (1) et (2) fournissent :

$$\frac{C - C_1}{A}(273 + t) = pv,$$

d'où

$$\frac{C - C_1}{A}(t' - t_0) = pv' - p_0v_0 ;$$

enfin, on a d'après la théorie mécanique de la chaleur :

$$dQ = C_1 dt + A p dv.$$

Cette équation étant intégrée donne :

$$Q = C_1(t' - t_0) + A \int_{v_0}^{v'} p dv ;$$

or, dans le cas présent : $Q = o$, puisqu'il n'y a ni chaleur perdue, ni chaleur gagnée, et par suite

$$-C_1(t' - t_0) = A \int_{v_0}^{v'} p dv,$$

en remplaçant dans l'équation (α), il vient :

$$\frac{u^2}{2g} = p_0v_0 - pv' + \int_{v_0}^{v'} p dv. \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (\xi)$$

Cette équation a été obtenue en supposant que le gaz qui s'écoule ne perd ni ne gagne aucune quantité de chaleur ; mais, sans tenir compte de cette condition, on peut, moyennant des hypothèses fort simples, mais qui s'écartent de la vérité, retrouver les formules préalablement indiquées.

366. Si l'on suppose que le volume du gaz reste constant pendant toute la durée de l'écoulement, $\int_{v_0}^{v'} pdv$ sera nécessairement nul ; on aura de plus $v' = o$; d'où il viendra :

$$\frac{u^2}{2g} = v_0(p_0 - p),$$

et si on suppose les pressions données en colonne d'eau, on aura

$$v_0 = \frac{(1 + at_0)\,13{,}59\,.\,0{,}76}{0{,}0013 d p_0}$$

et en remplaçant et effectuant :

$$u = 395\sqrt{\frac{(p_0 - p)(1 + at_0)}{p_0 d}}$$

formule identique avec la formule B du n° 309.

367. Remarquons que les deux relations se confondent sans qu'on soit obligé de faire aucune hypothèse particulière, quand la différence $p_0 - p$ est très-petite par rapport à p, ce qui est le cas des pressions faibles.

En effet, l'équation (α) se réduit à :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{C}{A}(t_0 - t'),$$

la formule de Poisson donne :

$$\frac{273 + t}{273 + t_0} = \frac{p^n}{p_0^n};$$

en posant $\frac{K-1}{K} = n$, de là on tire :

$$t_0 - t' = (273 + t_0)\,\frac{p_0^n - p^n}{p_0^n};$$

posons

$$p = m(p_0 - p)$$

d'où

$$p_0 = \left(1 + \frac{1}{m}\right)p,$$

on aura

$$p_0^n = \left(1 + \frac{1}{m}\right)^n p^n = p^n\left[1 + n \cdot \frac{1}{m} + n(n-1)\frac{1}{m^2} + \text{etc.}\right],$$

et comme m est supposé très-grand, on peut prendre

$$p_0^n = p^n\left(1 + \frac{n}{m}\right),$$

d'où

$$\frac{p_0^n - p^n}{p_0^n} = \frac{n}{m} \cdot \frac{m^n}{(1+m)^n},$$

et comme m est très-grand, on peut faire :

$$\frac{m}{1+m} = 1,$$

d'où

$$\frac{p_0^n - p^n}{p_0^n} = \frac{n}{m};$$

en remplaçant, on trouve :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{C}{A}(273 + t_0)\frac{n}{m};$$

mais pour un gaz déterminé, on a en écrivant l'équivalence de la chaleur et du travail de la dilatation :

$$\frac{n}{A} = \frac{C\ 0{,}76 \times 13{,}6a}{1{,}293 \cdot d};$$

en remplaçant $\frac{nC}{A}$, et m par leurs valeurs, il vient :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{(273 + t_0) \times 0{,}76 \times 13{,}6a}{1{,}293d} \cdot \frac{p_0 - p}{p},$$

et comme p est sensiblement égal à p_0, on a définitivement :

$$u^2 = 2g \cdot \frac{0{,}76 \times 13{,}6}{0{,}01293} \cdot \frac{p_0 - p}{p_0} \frac{(1 + at_0)}{d},$$

d'où

$$u = 395\sqrt{\frac{(p_0 - p)(1 + at_0)}{p_0 d}}.$$

368. Cette expression suffit, comme nous l'avons vu, moyennant l'emploi d'un coefficient de contraction, à représenter les conditions de l'écoulement des gaz sous les faibles pressions. Pour les pressions élevées, cette formule s'appliquera encore aux résultats d'expériences trouvés par MM. Saint-Venant et Wantzel d'une part et par MM. Poncelet et Pecqueur d'autre part, en prenant un coefficient variable de contraction, ou en modifiant empiriquement la formule. On ne peut cependant admettre que, théoriquement, cette expression représente les conditions de l'écoulement puisqu'elle ne tient pas compte de la variation de volume du gaz ; pour des changements de pression un peu considérables, il en résulterait une variation énorme de la température ; soit en effet, comme nous l'avons dit plus haut, t' la température du gaz à l'orifice. On doit avoir, puisque le volume reste constant :

$$\frac{p_0}{1 + at_0} = \frac{p}{1 + at'},$$

si on fait $to = 0$, et $p_0 = 2p$, il vient $t' = -137$.

Cet abaissement de température ne paraît point en rapport avec ce que l'on a pu observer à cet égard.

369. Si on suppose $t_0 = t'$, le gaz, dans ses variations de volume et de pression, suit la loi de Mariotte, et l'on a alors :

$$p_0 v_0 = pv'.$$

La formule (β) se réduit à :

$$\frac{u^2}{2g} = \int_{v_0}^{v'} p\, dv,$$

et comme on a :

$$p = \frac{p_0 v_0}{v},$$

il vient :

$$\frac{u^2}{2g} = p_0 v_0 \int_{v_0}^{v'} \frac{dv}{v} = 2{,}3026 p_0 v_0 \log \frac{v'}{v_0},$$

d'où

$$u^2 = 2g \cdot 2{,}3026 p_0 v_0 \log \frac{p_0}{p},$$

et comme

$$v_0 p_0 = \frac{(1 + at_0)\, 13{,}59 \times 0{,}76}{0{,}0013 d},$$

il vient :

$$u^2 = 2g \cdot 2{,}3026 \frac{7955\,(1 + at_0)}{d} \log \frac{p_0}{p},$$

qui est précisément la formule de M. Navier. Nous avons vu que cette formule ne peut être en aucun cas employée pour déterminer la vitesse d'écoulement des gaz, les conséquences qu'on en tire étant complétement en désaccord avec les résultats des expériences.

370. Appliquons maintenant la formule (β) dans les conditions mêmes où elle a été établie, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a ni chaleur acquise, ni chaleur cédée par le gaz. Nous avons vu que la formule (α) se simplifie et devient :

$$\frac{u^2}{2g} = -\frac{C}{A}(t' - t_0) = \frac{C}{A}(273 + t_0)\left(1 - \frac{273 + t'}{273 + t_0}\right);$$

or, dans l'hypothèse adoptée, la formule de Poisson donne :

$$\frac{273 + t'}{273 + t_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}},$$

d'où enfin :

$$u = \sqrt{\frac{2gC}{A} \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] (273 + t_0)}.$$

Dans cette formule, c représente la capacité calorifique du gaz à pression constante et K, le rapport de celle-ci à la capacité calorifique du même gaz à pression variable.

Remarquons que cette expression donne la vitesse du gaz qui s'écoule à la température t' et à la pression p ; si nous la ramenons aux conditions du milieu ambiant dont la pression est p et la température t, et si nous appelons u_1, la nouvelle valeur que prend la vitesse, nous aurons

$$\frac{u_1}{u} = \frac{v}{v'} = \frac{1 + at}{1 + at'} = \frac{1 + at}{1 + at'} \times \frac{1 + at_0}{1 + at'};$$

or

$$\frac{1+at_0}{1+at'} = \left(\frac{p_0}{p'}\right)^{\frac{k-1}{k}},$$

et

$$\frac{1+at}{1+at_0} = \frac{273+t}{273+t_0},$$

d'où

$$u_1 = u \cdot \frac{273+t}{273+t_0} \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{k}{\ldots}},$$

et par suite :

$$u_1 = (273+t) \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}} \sqrt{\frac{2gC}{A(273+t_0)} \cdot \left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}.$$

Si on veut enfin ramener la vitesse aux conditions du gaz du récipient dont la pression est p_0 et la température t_0, en appelant U la valeur que nous cherchons, on aura

$$\frac{U}{u} = \frac{v_0}{v'_1} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}},$$

d'où

$$U = u\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}},$$

ou enfin :

$$U = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2gC}{A}(273+t_0)\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad \text{(U)}.$$

371. Si l'on compare les valeurs de u, u_1, et U, on voit :

1° Que la valeur de u croît constamment depuis $p_0 = p$ jusqu'à $p_0 = \infty$; pour cette dernière valeur u atteint une limite qui est 735 mètres pour $t_0 = 0$.

2° Que la valeur de u_1 croît sans limite quand on fait varier p_0 de p à ∞ ;

3° Que U, nul d'abord pour $p_0 = p$, va ensuite en augmentant pour redevenir nul lorsque $p_0 = \infty$.

Cette valeur de U passe donc par un maximum. Ce maximum correspond à la valeur $p_0 = 1{,}575\ p$, ce qui fournit U = 194^m,57 en faisant $t_0 = o$.

Il faut remarquer que ce maximum de U, et la valeur nulle que prend cette quantité quand p_0 devient infini, n'impliquent pas une

absurdité, car si l'on détermine le poids de gaz qui s'écoule en une seconde par un orifice dont la surface est égale à 1, et il suffira pour cela de multiplier par la densité de l'air correspondante au cas que l'on considère, on trouve pour chacune des trois formules une même valeur :

$$Q = \frac{0{,}0013d}{0{,}76 \times 13{,}59a} \cdot p_0^{\frac{k-1}{k}} p^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2gC}{A(273+t_0)}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]},$$

dans laquelle d représente la densité du gaz par rapport à l'air et a le coefficient de dilatation de ce gaz.

Or, il est facile de voir que la valeur de Q augmente indéfiniment quand p_0 augmente indéfiniment et que par conséquent la dépense croît sans limite avec la pression.

372. M. Weisbach a cherché à vérifier les formules précédentes (*Revue universelle des mines et de la métallurgie*, tome XXVII) en laissant écouler par un orifice pratiqué en mince paroi l'air comprimé au préalable dans un récipient ; la pression était variable dans le récipient pendant toute la durée de l'expérience ainsi que la température ; M. Weisbach tient compte de ces différentes circonstances par une méthode qui se rapproche de celle qui a été employée par MM. Saint-Venant et Wantzel ; il a trouvé ainsi que, pour avoir la dépense pratique, il faut multiplier la dépense théorique par un coefficient qui varie avec la valeur des pressions ; en prenant des parois planes et des orifices circulaires de $0^m,01$ à $0^m,024$ de diamètre, M. Weisbach a trouvé que quand $p_0 - p$ varie depuis $0^m,15$ jusqu'à $0^m,85$ de mercure, le coefficient s'élève de 0,555 à 0,787.

373. Si dans la valeur de U nous faisons $t_0 = o$, $g = 9{,}8088$, $K = 1{,}41$, $c = 0{,}2377$ pour l'air, et si nous prenons des excès de pression représentés respectivement en atmosphères par :

0,01 0,1 0,5 1,0 5 10 100 ∞,

en supposant d'ailleurs la pression p_0 égale à une atmosphère, on trouvera pour valeurs correspondantes de U

$39^m,168$ $113^m,41$ $183^m,65$ $191^m,78$ $131^m,34$ $95^m,04$ $23^m,94$ 0 ;

si l'on compare ces valeurs avec celles que fournit la formule empirique de MM. Wantzel et Saint-Venant, on trouve que le rapport de ces dernières aux valeurs correspondantes de U est respectivement :

0,596 0,635 0,668 0,736 1,136 1,589 6,353 ∞

Ainsi, dans les conditions de pression où s'est placé M. Weisbach, le coefficient déduit des expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant varierait de 0,64 à 0,76 ; il y a donc une différence notable entre les résultats des deux séries d'expériences, qui cependant sont assez près d'être d'accord pour les plus fortes pressions employées par M. Weisbach.

376. Il n'est pas douteux que de nouvelles séries d'expériences ne soient nécessaires pour arriver à déterminer la véritable loi empirique de l'écoulement des gaz. Quant à la formule théorique obtenue en appliquant la théorie mécanique de la chaleur, elle semble peu satisfaisante ; l'augmentation rapide du coefficient de contraction lorsque la pression s'élève se maintient-elle au delà des pressions expérimentées par M. Weisbach ? Il y a lieu de le supposer, si on se reporte aux expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant d'une part, de MM. Poncelet et Pecqueur d'autre part ; s'il en était ainsi, quelle serait la valeur *théorique* d'une formule qui ne pourrait être appliquée qu'à la condition de la multiplier par un coefficient pouvant varier dans des limites très-étendues ?

Il est probable que l'hypothèse faite pour établir cette formule, à savoir qu'il n'y a ni chaleur perdue, ni chaleur gagnée pendant l'écoulement, n'est pas exacte ; et que par suite la formule qu'on en déduit se trouve fausse ; dans l'état de la question, des expériences nouvelles et très-variées, dans lesquelles il serait tenu compte du changement de la pression et de la température, non-seulement dans le réservoir, mais encore dans la veine, pourraient seules permettre de formuler une conclusion ayant quelque valeur.

En attendant, nous croyons que la formule du n° 358, qui résume sous une forme très-simple les expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant ainsi que celles de MM. Poncelet et Pecqueur, doit suffire aux besoins de la pratique ; elle est d'ailleurs d'un emploi plus commode et surtout plus rapide que les formules nouvelles.

CHAPITRE IV

Écoulement par des ajutages cylindriques et coniques.

375. Dans ce qui précède, nous avons supposé l'orifice d'écoulement percé dans une plaque d'une très-petite épaisseur relativement au diamètre de l'orifice ; il est important d'examiner l'influence de

l'épaisseur de la plaque et de la forme de l'orifice, ou, ce qui revient au même, l'écoulement par des tuyaux cylindriques ou coniques de faible longueur. Ces tuyaux portent le nom d'*ajutages*.

376. *Écoulement sous de faibles pressions par des ajutages cylindriques* (fig. 10). — Nous rapportons d'abord les résultats des expériences de d'Aubuisson, le seul ingénieur qui se soit occupé de cette question.

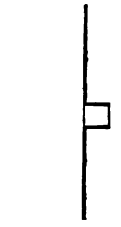


Fig. 10.

Les diamètres des ajutages dont s'est servi M. d'Aubuisson ont varié de $0^m,01$ à $0^m,03$; les longueurs, de 1 à 3 fois le diamètre, les pressions, de $0^m,027$ à $0^m,14$ d'eau; les coefficients de correction ont été compris entre 0,91 et 0,93 et la valeur moyenne déduite de 18 expériences a été de 0,926.

377. Comme, pour les liquides, le coefficient de correction dans les ajutages cylindriques est seulement de 0,82, j'ai eu des doutes sur l'exactitude des expériences de d'Aubuisson, et j'ai cru devoir reprendre la question. J'ai pris un tube de cuivre de $0^m,010295$ de diamètre, d'environ $0^m,30$ de longueur, très-sensiblement cylindrique; il a été coupé de manière à former des tubes de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14....., 30 millimètres de longueur; chacun a été ajusté avec beaucoup de soin, au moyen de cire molle, sur un orifice en mince paroi de même diamètre, et on a observé le temps de l'écoulement d'un même volume d'air, dans les mêmes circonstances : hauteur du baromètre, $0^m,76$; température, 17°; excès de pression en eau, $0^m,0417$, Pour des longueurs de

0	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm	12mm..... 30mm

les durées des écoulements ont été de

106″	106″	93″	88″	83″	83″	83″.....83″

378. Ainsi le maximum de vitesse a lieu pour une longueur égale à peu près aux $\frac{8}{10}$ du diamètre du tuyau; au delà et jusqu'à la longueur maximum du tuyau, le temps de l'écoulement est constant, parce que l'influence du frottement est sensiblement nulle. Le rapport de la vitesse dans l'ajutage cylindrique à la vitesse dans l'orifice en mince paroi est égal à 106 : 83 = 1,277; et par suite, le coefficient φ de contraction pour un ajutage cylindrique est égal à 0,65 . 1,277, c'est-à-dire à 0,83.

379. Ce dernier résultat est très-voisin de celui qui a été obtenu pour l'écoulement de l'eau, et il diffère beaucoup de celui qui résulte des expériences de d'Aubuisson; il est probable que ces expériences ont été faites en plaçant les ajutages sur des tubes dont les diamètres n'étaient pas très-grands relativement à ceux des ajutages, circonstance qui a une très-grande influence sur le coefficient de contraction par des orifices en mince paroi ou par des ajutages, et à laquelle jusqu'ici on n'avait pas fait attention.

380. L'accroissement de dépense par des ajutages cylindriques s'explique facilement. La veine qui sort du réservoir et qui se contracte entraîne l'air qui l'environnait au premier instant, et il se produit autour de la section contractée une détente qui s'ajoute à l'excès de pression en vertu duquel l'écoulement a lieu. Il résulte nécessairement de là un accroissement de dépense. On peut même, au moyen d'une considération très-simple, arriver par le calcul au résultat de l'expérience. Désignons par s la surface de l'orifice d'écoulement, par s' la section de la veine contractée; la détente qui aura lieu par l'accroissement de section sera $ps' : s$; ainsi la charge qui produira l'écoulement sera égale à $p\left(1+\frac{s'}{s}\right)$. Dans le cas que nous considérons, $s=1$, $s'=0{,}65$; la nouvelle pression sera $p.\ 1{,}65$, et par suite la nouvelle vitesse dans l'ajutage sera égale à celle qui a lieu dans l'orifice en mince paroi, multipliée par la racine carrée de 1,65 ou 1,28, nombre bien rapproché de celui qui résulte des expériences, lequel est, comme nous l'avons vu, 1,277.

381. *Perte de charge par un ajutage cylindrique.* — En répétant le raisonnement que nous avons fait au n° 332, nous trouverons que la perte de charge $P-p$ par un ajutage cylindrique est

$$P-p=\left(\frac{1}{\varphi^2}-1\right)p=Ap.$$

Dans cette formule, P est l'excès de la pression dans le réservoir sur la pression extérieure, p est la charge correspondante à la vitesse d'écoulement, φ est le coefficient de correction. Dans le cas qui nous occupe, φ est égal à 0,83, et il en résulte

$$P-p=0{,}451\ ;\quad \text{et}\quad A=0{,}451\ (1).$$

(1) Dans une note placée au bas de la page 161 du premier volume de ses *Études sur la ventilation*, M. le général Morin cherche à établir que cette évaluation de la *perte de charge* est erronée; à cet égard, nous ferons observer que le calcul indiqué n° 332

382. *Écoulement sous de grandes pressions par des ajutages cylindriques.* — On ne connaît à ce sujet que les expériences faites par M. Poncelet au moyen de l'appareil de M. Pecqueur, que nous avons décrit (353). Dans ces expériences, on plaçait des tubes de $0^m,01028$ de diamètre à l'extrémité d'un tuyau recourbé à angle droit de $0^m,30$ de longueur et de $0^m,04$ de diamètre intérieur.

Pour des longueurs de

$0^m,000$	$0^m,01$	$0^m,025$	$0^m,050$	$0^m,100$

les coefficients de réduction de la vitesse théorique ont été de

0,535	0,665	0,650	0,636	0,632

D'après ces expériences, le coefficient maximum est de 0,665, et il a lieu pour une longueur égale à peu près au diamètre du tube; le rapport de ce coefficient à celui qui correspond aux orifices en mince paroi est égal à $0,665 : 0,535 = 1,24$.

383. En appliquant ici les mêmes raisonnements que pour l'écou-

est absolument inattaquable et que de plus la quantité exprimée par Ap n'a pas à exprimer la perte de force vive, mais bien la quantité dont il faut diminuer P dans la formule qui donne la vitesse pour obtenir la vraie valeur de cette vitesse; c'est alors, en effet, une vraie *perte de charge*. Nous ajouterons que cette quantité A, qui n'entre dans la formule que comme coefficient empirique, *ne change en rien la valeur effective de la différence des pressions qui reste* P *dans tous les cas.*

Au reste, M. Poncelet trouve lui-même (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome XXI, page 191) que pour représenter le résultat de ses expériences, il doit employer la formule :

$$v^2 = \frac{2gP}{1,1\left[1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right)^2\right]}$$

les valeurs v et φ étant celles-là mêmes qui sont le résultat de ses expériences, cela prouve que le coefficient φ qui entre dans la formule

$$v^2 = \frac{2gP}{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right)^2}$$

qu'admet M. Morin, ne peut être le coefficient de contraction, ou plutôt, comme le dit M. Poncelet, qu'il doit y avoir d'autres causes de perte vive que celle qui donne cette dernière formule, et c'est pour en tenir compte qu'il introduit un nouveau coefficient; ce luxe de coefficients nous paraît inutile et se trouve supprimé dans la formule de Péclet, qui exprime simplement les faits tels que l'expérience les fournit.

Disons encore que pour faire accorder les résultats de l'expérience avec la formule qu'il admet, M. le général Morin (page 178 du même volume de son ouvrage) prend le coefficient φ (m dans ses notations) égal à 0,60, quand, ainsi que nous l'avons fait voir et qu'il le dit lui-même en note, la valeur du coefficient de contraction est de 0,80 environ.

lement sous de faibles pressions (382), on trouve que le rapport de la vitesse maximum dans l'ajutage à la vitesse dans l'orifice en mince paroi, est égal à $\sqrt{1,54} = 1,24$, exactement le chiffre trouvé par l'expérience.

384. On peut aussi déduire de l'accord du calcul et de l'expérience que, pour des ajutages cylindriques, le rapport du coefficient de correction au coefficient c relatif à l'orifice à mince paroi est égal à $\sqrt{1+c}$; alors la valeur du premier est égale à $c\sqrt{1+c}$. On trouve ainsi que pour les différentes pressions que nous avons considérées,

$0^{at},01$ $0^{at},1$ $0^{at},5$ 1^{at} 5^{at} 10^{at} 100^{at},

les coefficients de correction pour les ajutages cylindriques sont

0,834 0,82 0,71 0,67 0,54 0,51 0,487.

M. Weisbach a trouvé que pour des ajutages courts et cylindriques de 0,01 à 0,024 de diamètre, on peut employer la formule U du n° 372, le coefficient variant depuis 0,780, jusqu'à 0,833, suivant la pression. Le coefficient augmente avec la pression. M. Weisbach n'indique pas les valeurs limites de ses expériences (*Revue universelle des Mines et de la Métallurgie*, tome XXVII).

385. *Ajutage cylindrique placé à l'extrémité d'un tuyau dont le diamètre est comparable à celui de l'ajutage* (fig. 11). — Nous venons de voir que, pour un ajutage cylindrique placé sur un tuyau d'un diamètre beaucoup plus grand, le coefficient de contraction, dans le cas de l'écoulement sous de faibles pressions, est égal à 0,83. A mesure que le diamètre de l'ajutage augmente, la valeur de ce coefficient doit augmenter; car, lorsque les deux diamètres sont égaux, le coefficient devient égal à l'unité. Les expériences faites à ce sujet n'ont rien donné de complétement satisfaisant. Cependant, en partant de celles qui présentaient le plus de chances d'exactitude, je suis arrivé à former le tableau suivant, qui donne, pour différents rapports des diamètres, les valeurs des coefficients de correction et de perte de charge.

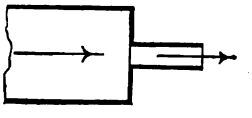


Fig. 11.

Rapports d : D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Valeurs de φ	0,83	0,82	0,83	0,84	0,86	0,88	0,91	0,94	0,97	1
Valeurs de A	0,45	0.49	0,45	0,42	0,35	0,29	0,81	0,13	0,06	0

Ces valeurs ne sont réellement que des valeurs approchées, mais

je les regarde comme suffisamment exactes pour toutes les applications.

386. *Ajutages coniques convergents* (fig. 12). — D'Aubuisson a fait un grand nombre d'expériences sur ce genre d'ajutage (*Traité d'hydraulique*). Voici les résultats :

Angles de convergence.....	6°	11°21′	18°54′	28°4′	53°8′
Coefficient de contraction φ.	0,938	0,947	0,917	0,880	0,798

D'Aubuisson ne dit pas comment ces ajutages étaient appliqués au réservoir, s'ils étaient fixés sur une surface plane d'une grande étendue, ou à l'extrémité d'un cylindre ayant pour diamètre celui de l'ajutage à l'entrée. On pourrait penser cependant que les expériences ont été faites dans le premier cas, d'après les lignes suivantes qui en terminent le résumé : « Un coup d'œil jeté sur ce tableau suffit pour montrer les avantages d'un ajutage court et peu convergent. Lorsque l'angle de convergence ne dépassera pas 10 à 12°, le coefficient sera d'environ 0,94 ; à mesure qu'il deviendra plus grand, le coefficient et la dépense diminueront et l'on se rapprochera des phénomènes que présentent les orifices en mince paroi. »

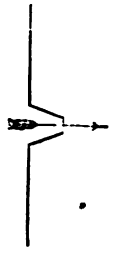


Fig. 12.

387. Il est important d'examiner séparément les deux cas dont il est question; car l'influence de l'angle de convergence n'est pas la même. Quand l'ajutage est placé sur une surface plane d'une grande étendue, en supposant que l'angle de convergence croisse d'une manière continue de 0 à 180°, le coefficient de contraction, d'abord égal à 0,83, ira en croissant jusqu'à une certaine limite correspondant à la convergence de la veine dans un ajutage cylindrique. Le coefficient doit alors être égal à 1, et au delà il doit diminuer pour devenir 0,65 à la limite extrême. Dans le second cas, pour les mêmes variations de l'angle de convergence, le coefficient, d'abord égal à l'unité, doit diminuer progressivement, de manière à devenir encore égal à 0,65 quand l'angle devient égal à 180°.

388. *Ajutages coniques placés sur une surface plane d'une grande étendue* (*fig.* 13). — Remarquons d'abord que, dans un ajutage cylindrique, le diamètre de la section contractée est égal à $\sqrt{0,65} = 0,8$, le diamètre de l'orifice étant 1 ; l'angle au sommet d'un cône qui passerait par les deux sections, en supposant leur distance égale à l'unité, comme l'expérience l'indique, serait d'environ 24°, ce qui

porte tout d'abord à croire que, pour un ajutage conique d'un angle de 24°, le coefficient serait égal à 1.

Il résulte en effet des expériences, que le coefficient de contraction augmente rapidement quand l'angle au sommet du cône passe de 0° à 30°, où il est égal à 1 ; qu'il décroît très-rapidement quand l'angle passe de 30 à 50°, où il est plus petit que pour un tuyau cylindrique ; et qu'il décroît ensuite très-lentement jusqu'à 180°, où il devient égal à 0,65.

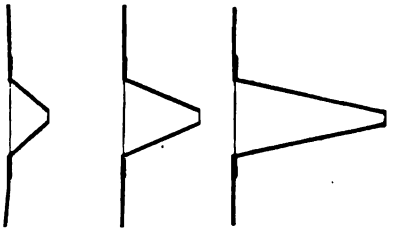


Fig. 13.

389. Le tableau suivant donne les valeurs approximatives de φ et de A pour les différents angles au sommet.

ANGLES.	VALEURS DE φ	VALEURS DE $A = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$	ANGLES.	VALEURS DE φ	VALEURS DE $A = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$
0°	0,83	0,45	60°	0,76	0,73
5	0,95	0,11	80	0,77	0,83
10	0,98	0,04	100	0,72	0,63
20	0,99	0,02	120	0,70	1,04
30	1,00	0,00	140	0,68	1,16
40	0,95	0,11	160	0,67	1,22
50	0,80	0,56	180	0,65	1,366

On voit, à l'inspection de ce tableau, que pour des angles au sommet compris entre 5 et 40° il n'y a pas de perte sensible de charge.

390. *Ajutage conique convergent placé à l'extrémité d'un tuyau.* Quand un ajutage conique (*fig.* 14) est placé à l'extrémité d'un cylindre dont le diamètre est égal au diamètre maximum de l'ajutage, le coefficient de correction doit varier évidemment depuis l'unité pour un angle de 0°, jusqu'à 0,65 pour un angle de 180°. Le tableau suivant donne les valeurs de φ et de A pour les divers angles au sommet.

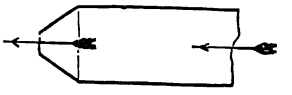


Fig. 14.

ANGLES.	VALEURS DE		ANGLES.	VALEURS DE	
	φ	$A = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$		φ	$A = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$
0°	1,00	0,00	100°	0,80	0,56
10	0,97	0,06	120	0,75	0,78
20	0,93	0,16	140	0,73	0,88
30	0,89	0,26	150	0,71	0,98
40	0,86	0,35	160	0,69	1,10
60	0,83	0,45	170	0,67	1,23
80	0,82	0,49	180	0,65	1,366

Dans ses expériences pour la vérification de la formule U du n° 372, M. Weisbach a trouvé les résultats suivants :

Avec une embouchure conoïde arrondie, la valeur du coefficient applicable à cette formule varie de $0^m,965$ à $0^m,985$ pour des excès de pression variant de $0^m,15$ à $0^m,85$ de mercure.

Avec des embouchures coniques courtes et arrondies, ou avec de plus longues en forme de tuyère et de différents diamètres, le coefficient varie de 0,95 à 0,97.

Avec un tuyau conique convergent non arrondi, de $0^m,01$ de diamètre et de $2°,7'$ de convergence, le coefficient varie de 0,910 à 0,964 Il. est facile de voir que pour les faibles pressions, les résultats tirés des formules diverses coïncident sensiblement.

391. *Ajutages coniques divergents* (*fig.* 15). — Je ne connais aucune expérience ayant eu pour objet de déterminer l'influence des ajutages coniques divergents sur la vitesse d'écoulement des gaz. On en a fait seulement un grand nombre relativement aux diminutions de pression qui se produisent principalement à l'origine des tuyaux évasés. Nous reviendrons plus tard sur ce sujet. Mais Venturi et Eytelwein ont fait des expériences nombreuses sur l'écoulement de l'eau par des ajutages coniques divergents. Comme les gaz qui s'écoulent sous de faibles pressions n'éprouvent pas de variations sensibles de densité, ils doivent se comporter comme les liquides : c'est pourquoi nous rapporterons avec quelques détails les expériences de ces deux ingénieurs, d'après d'Aubuisson.

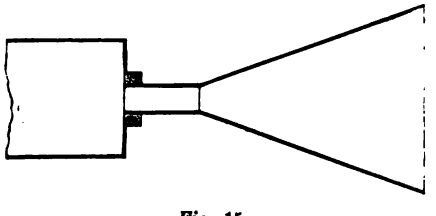


Fig. 15.

392. *Expériences de Venturi* (*fig.* 16). — L'ajutage se composait de deux troncs de cônes opposés par leurs petites bases. On avait AB = 0^{m},0406; A'B' = 0^{m},03497; AA' = 0^{m},02482; et les surfaces AB et A'B' étaient de 0^{mq},001296; 0^{mq},000960. Venturi a fait varier l'angle au sommet du second cône de 3°30' à 14°14'; l'écoulement avait toujours lieu sous une charge de 0^{m},88, qui correspondait à une vitesse théorique de 4^{m},155. On observait le temps de l'écoulement d'un volume d'eau égal à 0^{mc},137. Venturi conclut de ses expériences, que l'ajutage de plus grande dépense doit avoir une longueur égale à 9 fois le diamètre de la plus petite base, et un évasement de 5°,6'. Il donnerait, d'après l'auteur, une dépense 2,4 fois plus grande qu'un orifice en mince paroi, et 1,46 fois plus grande que la dépense théorique. Cependant dans une autre expérience, citée à la page suivante, la vitesse d'écoulement serait égale à 1,68 de la vitesse théorique.

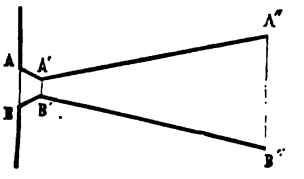


Fig. 16.

393. *Expériences de Eytelwein* (*fig.* 17). — Cet ingénieur a pris une série de tuyaux de 0^{m},26 de diamètre et de différentes longueurs, qu'il a successivement adaptés à un vase plein d'eau, d'abord seuls, puis portant à l'extrémité antérieure l'embouchure M, qui avait à peu près la forme de la veine contractée; ensuite, portant à l'autre extrémité l'ajutage évasé P, de la forme recommandée par Venturi; enfin, munis à la fois de l'embouchure et de l'ajutage. L'écoulement avait lieu sous une charge constante de 0^{m},73.

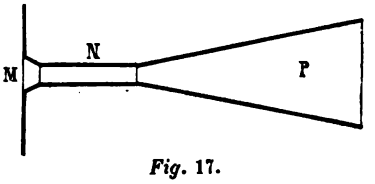


Fig. 17.

Dans ses premières expériences, Eytelwein a fait varier la longueur du tuyau; il a trouvé que la dépense avec l'embouchure, le tube et l'ajutage, augmentait à mesure que la longueur du tube diminuait, et que pour une longueur de tube de 0^{m},078 la dépense était égale à 1,35 de celle qui avait lieu avec le tube seul. En supprimant complétement le tube intermédiaire, avec l'embouchure au réservoir seule, la dépense comparée à la dépense théorique a été de 0,92; l'ajutage appliqué directement au réservoir a donné une dépense de 1,18; et avec l'embouchure et l'ajutage, la dépense a été de 1,55. Ainsi, l'ajutage a augmenté l'effet de l'embouchure dans le rapport de 0,92 à 1,55, ou de 1 à 1,69.

394. *Nouvelles expériences.* — J'ai fait de nombreuses expériences sur l'écoulement de l'air par des cônes divergents, et j'ai constaté plusieurs faits importants. Ainsi, lorsque l'angle au sommet du cône dépasse 10°, la veine d'air n'occupe pas toute la section. L'air extérieur entre par les faces intérieures, et il se produit le mouvement indiqué par la figure 18. En présentant sur les bords du cône de petits flocons d'édredon, ils sont aspirés et restent dans le cône en tourbillonnant sur eux-mêmes.

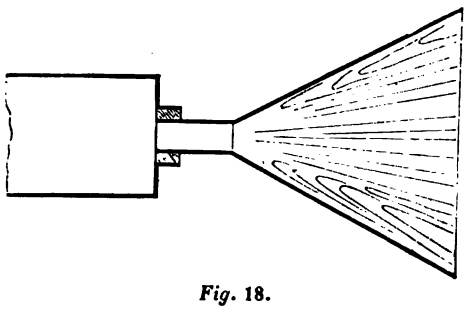


Fig. 18.

395. On peut facilement se rendre compte de ces phénomènes. La veine d'air qui sort de l'ajutage cylindrique tend à continuer son mouvement dans la même direction ; mais comme elle entraîne l'air primitivement stagnant qui l'environne, elle se détend pour occuper la section du cône, et il en résulte nécessairement que la tension de l'air dans chaque section du cône décroît du centre à la circonférence. A une certaine distance du réservoir, la tension de l'air à circonférence devient égale à la pression atmosphérique, et à partir de ce point l'air extérieur doit entrer contre la surface du cône et sortir autour de la veine. D'après cela, l'accroissement de la vitesse dans l'ajutage cylindrique dépend de l'étendue de la section où pénètre l'air extérieur et de la vitesse moyenne de l'air dans cette section. Si, dans tous les points d'une même section d'un cône, les vitesses étaient les mêmes, la section d'écoulement à plein orifice, pour tous les cônes, aurait toujours la même étendue, et par conséquent l'effet d'un ajutage conique, suffisamment prolongé, et abstraction faite des frottements, serait toujours le même ; mais comme il n'en est pas ainsi, la section dont il s'agit a une étendue d'autant plus petite que les variations de tension dans une même tranche, de la circonférence au centre, sont plus rapides, et on conçoit facilement l'influence de l'angle du cône et du défaut de coïncidence des axes de la douille et du cône.

396. Si on appelle v la vitesse correspondant à la charge P dans le réservoir, et v_1 la vitesse moyenne dans la partie cylindrique de l'ajutage divergent, on aura $v_1 = \psi v$, ψ étant un coefficient de correction plus grand que l'unité. Si p est la charge correspondant à la

vitesse v_1, il est évident que p sera plus grand que P. L'ajutage produit un accroissement de charge p —P, qu'il est facile de calculer en répétant les raisonnements du n° 332. On trouve ainsi

$$P - p = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1\right) p = - Bp.$$

En réunissant les expériences faites sur des cônes dont les angles au sommet ont varié de 0° à 180°, j'ai pu former le tableau suivant qui donne les valeurs approximatives de ψ et de B pour les angles compris entre 0° et 50°. Pour les angles plus grands, la valeur de ψ est toujours sensiblement égale à l'unité.

ANGLES.	VALEURS DE		ANGLES.	VALEURS DE	
	ψ	$B = 1 - \frac{1}{\psi^2}$.		ψ	$B = 1 - \frac{1}{\psi^2}$.
0°	1,00	0,00	9°	1,95	0,67
1	1,24	0,35	10	1,50	0,56
2	1,48	0,54	12	1,40	0,49
3	1,70	0,66	16	1,35	0,45
4	1,95	0,74	20	1,30	0,41
5	2,25	0,80	25	1,26	0,37
6	2,40	0,83	30	1,18	0,28
7	2,45	0.83	40	1,08	0,14
8	2,30	0,81	50	1,05	0,10

Le maximum d'effet a lieu pour un angle d'environ 7°. La vitesse et par suite le volume écoulé sont augmentés dans le rapport de 1 à 2,45.

397. Si un tuyau cylindrique se terminait par un tronc de cône évasé (*fig.* 19), les mêmes phénomènes se produiraient, et, pour avoir le volume écoulé, il faudrait se servir des formules et des coefficients que nous avons donnés dans les numéros précédents.

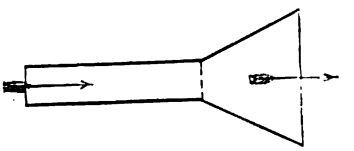


Fig. 19.

398. *Ajutages qui pénètrent dans le réservoir.* — Nous avons supposé jusqu'à présent que l'ajutage venait toujours affleurer la paroi intérieure du réservoir. Si, au contraire, il pénétrait dans l'intérieur d'une certaine quantité, les coefficients de contraction ne seraient plus les mêmes.

Ainsi, pour un ajutage cylindrique (*fig.* 20) de $0^m,00772$ de dia-

mètre, pénétrant de 5 millimètres dans le réservoir, le coefficient de contraction a été trouvé égal à 0,78.

Pour les ajutages coniques (*fig.* 21), le coefficient de contraction diminue ou augmente suivant l'angle du cône. Ainsi, pour des angles au sommet de 43° et de 29°, les coefficients de contraction ont été

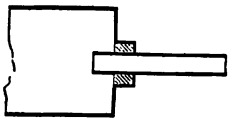


Fig. 20.

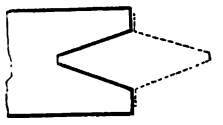


Fig. 21.

égaux pour l'ajutage placé extérieurement (position ponctuée de la figure) à 0,824 et à l'unité, et pour l'ajutage placé intérieurement, à 0,611 et 0,620; c'est-à-dire qu'ils ont été très-notablement plus faibles. Au contraire, pour un angle au sommet de 5° 30′, les coefficients de contraction, suivant que l'ajutage était placé extérieurement ou intérieurement, ont été de 0,96 et 1,02. Ainsi, dans ce dernier cas, la vitesse a été plus grande pour l'ajutage intérieur que pour l'ajutage extérieur.

CHAPITRE V.

Frottement dans les tuyaux de conduite de gaz.

399. Lorsqu'un gaz parcourt un tuyau, il éprouve par le frottement une résistance qui diminue sa vitesse. La détermination de cette résistance est d'une grande importance, car dans un grand nombre d'applications industrielles il faut mettre des gaz en mouvement dans des tuyaux de conduite.

400. *Expériences de Girard.* — Les premières expériences qui ont été faites sur l'écoulement des gaz par les tuyaux de conduite datent de 1821 ; elles sont dues à Girard. Cet ingénieur a employé le gazomètre et les tuyaux de distribution de l'appareil d'éclairage de l'hôpital Saint-Louis (*Annales de chimie et de physique*, t. XVI). Le gazomètre avait une section transversale de $9^{mq},4968$; dans toutes les expériences, l'excès de pression du gaz sur l'atmosphère a été maintenu à $0^{m},03383$ en colonne d'eau ; la marche du gazomètre était indiquée par un index qui parcourait une échelle gra-

duée ; une chaîne convenablement disposée compensait la perte de poids qu'éprouvait la cloche à mesure qu'elle s'enfonçait dans l'eau. Le gaz s'écoulait par un tuyau de fonte de $0^m,08121$ de diamètre, de 623 mètres de longueur, posé à peu près horizontalement à $0^m,70$ au-dessous du sol, et qui pouvait être ouvert à différentes distances du gazomètre.

Girard a aussi observé l'écoulement d'un gaz dans des tuyaux formés de canons de fusil ayant $0^m,01579$ de diamètre, et dont la longueur a été portée jusqu'à 127 mètres. Le gaz était pressé par un petit gazomètre, sous une charge constante de $0^m,03383$ d'eau, la même que pour le grand gazomètre.

Dans toutes les expériences, on observait la descente du gazomètre pendant plusieurs minutes. On en déduisait le volume de gaz écoulé par seconde, et par suite la vitesse d'écoulement en divisant ce volume par la section du tuyau.

401. Pour obtenir la vitesse d'écoulement en fonction de la pression et des dimensions de la conduite, Girard a posé la formule

$$(1)\ldots\ldots\quad v^2 = \frac{g\mathrm{PD}}{4\mathrm{L}\,.\,b}, \quad \text{qui revient à} \quad p = \frac{\mathrm{PD}}{\mathrm{KL}} \quad \ldots\ldots\ldots(2)$$

en faisant $p = v^2 : 2g$, et $\mathrm{K} = 8b$. P est la charge du gazomètre en hauteur de gaz, L et D représentent la longueur et le diamètre de la conduite, et K le coefficient de frottement.

402. Trois expériences ont été faites avec le tuyau de $0^m,08121$ de diamètre, le grand gazomètre étant rempli de gaz d'éclairage. Les longueurs des tuyaux étaient de $128^m,80$; $375^m,80$; $622^m,80$. On a obtenu, au moyen de l'équation (1), trois valeurs de b fort peu différentes, dont la moyenne est égale à 0,00228 ; ce qui donne $\mathrm{K} = 8b = 0,817824$.

Trois expériences faites avec les mêmes tuyaux, le gazomètre étant plein d'air, ont donné encore trois valeurs de b presque identiques, dont la moyenne est égale à 0,002247 : ce qui donne $\mathrm{K} = 8b = 0,017976$.

Cinq expériences, faites avec des tuyaux formés de canons de fusil de $0^m,01579$ de diamètre, dont les longueurs étaient de $37^m,53$; $56^m,84$; $85^m,06$; $109^m,04$, et $126^m,58$, le gazomètre étant rempli de gaz d'éclairage, ont donné pour b une valeur moyenne de 0,00326, ce qui donne $\mathrm{K} = 8b = 0,02608$.

Enfin dix expériences, faites avec des tuyaux formés de canons de fusil, dont les longueurs étaient de $36^m,91$; $55^m,91$; $88^m,06$;

111m,24 ; 37m,53 ; 56m,84 ; 85m,06 ; 109m,04 ; 126m,58 ; 6m,58, le gazomètre étant rempli d'air, ont donné, pour valeur moyenne de b, 0,00323, ce qui donne $K = 8b = 0{,}02584$.

403. Il résulte de toutes ces expériences :

1° Que la formule admise représente aussi exactement qu'on peut le désirer les phénomènes qui se produisent : car, pour de très-grandes variations de longueur dans chacun des deux systèmes de conduite, la valeur de K est restée constante ;

2° Que dans chaque système la valeur de K a été la même pour le gaz de l'éclairage, dont la densité est 0,55, et pour l'air atmosphérique : ainsi, il est très-probable que la résistance que les gaz éprouvent en s'écoulant par des tuyaux est indépendante de leur nature ;

3° Que le coefficient de frottement n'est pas le même dans les tuyaux de 0m,08121 et de 0m,01579. Girard attribue cette différence à deux causes. La première serait la différence de nature des surfaces : les tuyaux de fonte, servant depuis longtemps à conduire le gaz d'éclairage, étaient recouverts intérieurement d'une couche de goudron qui rendait la surface parfaitement unie, tandis que dans la conduite formée de canons de fusil les surfaces intérieures étaient oxydées. La seconde cause consisterait en ce que, la résistance ayant lieu à la circonférence du tuyau, la vitesse croît de la circonférence au centre, et en ce que la vitesse moyenne, qu'on prend pour la vitesse à la circonférence, s'éloigne d'autant plus de cette dernière que le diamètre est plus grand ; alors les valeurs de v qu'on prend pour déterminer K sont trop grandes, et l'excès est plus considérable pour la grande conduite que pour la petite.

404. *Expériences de d'Aubuisson.* — Ces expériences remontent à 1827. Un extrait du grand travail de cet ingénieur se trouve dans son *Traité d'Hydraulique*. La grande conduite sur laquelle les expériences ont été faites avait près de 400 mètres de longueur. En la prenant par parties, on mettait en évidence l'influence de la longueur, et pour chaque longueur on faisait varier la pression qui mettait l'air en mouvement. On changeait aussi la vitesse, en plaçant à l'extrémité des ajutages de différents diamètres. Enfin, pour observer l'influence des diamètres des tuyaux, d'Aubuisson a fait des expériences sur deux petites conduites de 55 mètres de longueur, ayant l'une la moitié, l'autre le quart du diamètre de la grande.

Dans ces recherches, l'air n'était pas lancé dans les tuyaux par la

pression d'un gazomètre, comme dans les expériences de Girard, mais par une machine soufflante, une trompe, analogue à celles qu'on emploie dans les forges des Pyrénées ; elle consistait en un tronc de sapin évidé, vertical, de $8^m,40$ de longueur, aboutissant par le bas à une simple barrique de $1^m,15$ de diamètre au milieu et de $1^m,32$ de hauteur, ouverte par le fond inférieur qui plongeait dans un petit bassin de $0^m,85$ de profondeur. Cette trompe recevait l'eau d'un ruisseau débitant de $0^{mc},025$ à $0^{mc},030$ par seconde. Un réservoir garni d'une vanne avait été disposé de manière à connaître exactement la quantité d'eau employée. Cette trompe pouvait donner à l'air qu'elle appelait et qu'elle comprimait un excès de pression sur l'atmosphère de $0^m,85$ d'eau, ce qui correspond à une vitesse de 109 mètres à peu près.

406. La grande conduite, qui était destinée à la ventilation d'une mine, consistait en tuyaux de fer-blanc de $0^m,10$ de diamètre, soudés bout à bout ; à son origine elle présentait deux coudes de 90°, mais bien arrondis ; à 80 mètres de distance elle entrait dans la galerie et se prolongeait en ligne droite jusqu'à 387 mètres. Ce tuyau communiquait avec le réservoir d'air par un ajutage évasé vers le réservoir.

A l'extrémité de la conduite on adaptait des ajutages ou buses destinés à diminuer l'orifice d'écoulement. Pour la conduite de $0^m,10$ de diamètre, les diamètres des orifices des buses ont été de $0^m,05$ $0^m,03$, $0^m,02$; pour la conduite de $0^m,5$ de diamètre, ils étaient de $0^m,03$, $0^m,02$, $0^m,01$; enfin pour la conduite de $0^m,025$, ils ont été de $0^m,02$ et $0^m,01$. Chaque ajutage portait une tubulure destinée à recevoir un manomètre à eau ; un autre manomètre était placé sur le réservoir d'air comprimé.

406. Dans ce mode d'expérience, on mesurait les pressions P et p, aux deux extrémités de la conduite : mais la vitesse dans le tuyau était plus petite que celle de sortie dans le rapport inverse des sections ; alors, en admettant que le frottement soit proportionnel au carré de la vitesse, on a

$$P - p = \frac{KL\varphi^2 d^4}{D^5} p ; \quad \text{d'où} \quad p = \frac{PD^5}{KL\varphi^2 d^4 + D^5} \qquad \ldots\ldots\ldots (2)$$

car la vitesse est

$$\varphi \frac{d^2}{D^2} \sqrt{2gp},$$

d et D représentant les diamètres de la buse et du tuyau, φ le coef-

ficient de contraction à l'entrée de la buse, et K le coefficient de frottement.

Mais il faut remarquer que le manomètre placé à l'extrémité du tuyau indique la pression du gaz en ce point, et non pas la pression qui produit l'écoulement par la buse; car cette dernière est évidemment égale à la hauteur du manomètre augmentée de la hauteur correspondante à la vitesse dans le tuyau, de sorte qu'en désignant cette dernière charge par p', on a

$$p' = p + p\,\frac{2d^4}{D^4}\ ;$$

mais comme d était toujours très-petit relativement à D, le second terme de la valeur de p' était négligeable, et on pouvait prendre p pour p'. En supposant $d = D : 3$, le second terme de la valeur de p' devient 0,0107 p.

407. Plus de 1000 expériences ont été faites par d'Aubuisson et l'ingénieur Marrot; 325 rapportées dans les *Annales des mines* ont servi à la détermination de la valeur de K; l'ensemble de toutes ces expériences donne K = 0,0238.

Je citerai quelques-uns des résultats obtenus.

Une série de 15 expériences faites sur des tuyaux de $0^m,10$ de diamètre, dont les longueurs ont varié de $100^m,60$ à $387^m,14$, avec une buse de $0^m,05$ de diamètre, et dans lesquelles les pressions en eau dans le réservoir ont varié de $0^m,58$ à $0^m,25$, ont donné pour valeur moyenne de K, 0,0228; les valeurs extrêmes ont été de 0,0258 et 0,0193.

Les expériences faites sur les mêmes tuyaux, dans les mêmes circonstances, mais avec une buse de $0^m,03$ de diamètre, et pour des excès de pression compris entre $0^m,54$ et $0^m,38$ ont donné 0,0225 pour la valeur de K; les valeurs extrêmes ont été de 0,0285 et 0,0200.

Six expériences faites sur des tuyaux de $0^m,05$ de diamètre, dont les longueurs ont varié de $9^m,35$ à $55^m,53$ et les pressions de $0^m,47$ à $0^m,54$, avec une buse de $0^m,03$, ont donné K = 0,0234; les valeurs extrêmes ont été de 0,0244 et 0,0226.

Les mêmes expériences répétées avec une buse de $0^m,02$ de diamètre, et des pressions comprises entre $0^m,68$ et $0^m,83$, ont donné K = 0,0244; les valeurs extrêmes ont été de 0,0262 et 0,0227.

408. « J'ai comparé, dit M. d'Aubuisson, les valeurs de p déduites de la formule (2) avec plus de trois cents observations, et les résul-

tats du calcul ont suivi ceux de l'expérience dans toutes leurs variations, quelles que fussent les conduites et les buses employées, lorsque la section de celles-ci était les 0,74 de la section des premières, tout comme lorsqu'elle n'en était que les 0,04. Ainsi notre formule, bien qu'elle ne soit pas parfaitement exacte en théorie, a pleinement la sanction de l'expérience, au moins dans les limites où nous l'avons appliquée, et c'est entre ces limites que se trouvent presque tous les cas de la pratique. »

409. *Expériences de M. Pecqueur et de M. Poncelet.* — En 1845, à l'occasion d'un projet de chemin de fer atmosphérique, M. Pecqueur a fait, de concert avec MM. Bontemps et Zambaux, de nombreuses expériences sur l'écoulement de l'air par de longs tuyaux de conduite. Ces expériences ont été l'objet d'un mémoire présenté à l'Académie des sciences, sur lequel M. Poncelet a fait un rapport très-étendu, renfermant les résultats de nouvelles expériences faites sous sa direction (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. XXI). L'appareil de M. Pecqueur a été décrit (355).

410. M. Poncelet cite dans son rapport une série d'expériences dans lesquelles on avait supprimé le petit réservoir, et où l'écoulement avait lieu directement dans l'atmosphère, sous un excès de pression constant; les tuyaux en plomb étiré avaient $0^m,01028$ de diamètre; le volume d'air écoulé, ramené à la pression atmosphérique de $0^m,76$, a été constamment de $1^{mc},463$; la température était de 20°. Pour des longueurs de

$18^m,00$	$9^m,00$	$4^m,50$	$2^m,25$	$1^m,125$	$0^m,562$	$0^m,281$	$0^m,14$	$0^m,07$

les durées des écoulements ont été de

202″	148″	106″	85″	72″	59″	53″	51″	51″

alors les dépenses par seconde en air, sous la pression de l'atmosphère ont été de

$0^{mc},00724$	$0^{mc},00989$	$0^{mc},01380$	$0^{mc},01720$	$0^{mc},02032$	$0^{mc},02480$	$0^{mc},02760$	$0^{mc},0287$	$0^{mc},0287$

411. M. Poncelet a reconnu que les résultats de ces expériences étaient très-bien représentés par une formule équivalente à la suivante

$$Q = S\frac{P_1}{p_1}\sqrt{\frac{2g(P_1 - p_1)}{A_1 + \frac{KL}{D}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

dans laquelle Q représente le volume d'air écoulé sous la pression de l'atmosphère; S la section du tuyau; P_1 et p_1 les pressions intérieure et extérieure en air comprimé; A_1 un coefficient constant égal à 2,475; K un coefficient constant égal à 0,0236; L et D la longueur et le diamètre du tuyau.

Pour faire voir le degré d'approximation que donne la formule (3), je donnerai les résultats du calcul. En prenant, comme l'a fait M. Poncelet, 0,004 au lieu de 0,00365 pour le coefficient de dilatation des gaz afin de corriger l'erreur provenant de la vapeur d'eau de l'air, la vitesse $\sqrt{2g(P_1 - p_1)}$ due à la charge est égale à $290^m,23$; $S = 0^{mc},000083$; $K : D = 2,36$; $P_1 : p_1 = 2$; et la formule dans le cas dont il s'agit devient :

$$Q = 0^{mc},048178 \sqrt{\frac{1}{2,475 + 2,36L}}.$$

En substituant dans cette formule, pour L, les valeurs indiquées, on trouve pour Q les valeurs suivantes :

$0^{mc},00718$ $0^{mc},00989$ $0^{mc},01331$ $0^{mc},01727$ $0^{mc},02067$ $0^{mc},02471$ $0^{mc},02720$ $0^{mc},02876$ $0^{mc},02965$

nombres qui sont aussi rapprochés de ceux de l'expérience qu'on pouvait l'espérer.

412. Le volume Q_1 d'air écoulé sous la pression P_1 serait évidemment égal à $Qp_1 : P_1$; et la vitesse d'écoulement serait égale à $Qp_1 : P_1S$; alors en désignant par P l'excès $P_1 - p_1$, et par p la charge correspondante à la vitesse v, on aura

$$\frac{v^2}{2g} \quad \text{ou} \quad p = \frac{P}{A_1 + \frac{KL}{D}}; \quad \text{ou} \quad P - p = p\left(A_1 - 1 + \frac{KL}{D}\right);$$

et

$$P - p = p\left(1 + A + \frac{KL}{D}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

en posant $A = A_1 - 2$. A est un coefficient constant qui représente la perte de charge à l'embouchure du tuyau. En effet, A, d'après la formule de M. Poncelet, est égal à 0,475, nombre bien rapproché de 0,451 que nous avons trouvé (383) pour le coefficient de perte de charge.

413. *Nouvelles expériences.* — J'ai fait plusieurs séries d'expériences sur des tuyaux de fer-blanc, construits avec beaucoup de soin, ayant chacun $0^m,20$ de longueur et $0^m,009$ de diamètre, qu'on ajoutait

avec des douilles de manière à former des tubes de $0^m,20$; $0^m,40$; $0^m,60$; $0^m,80$; $1^m,00$. Les tuyaux communiquaient avec le réservoir tantôt directement, tantôt au moyen d'un tronc de cône. J'ai aussi employé des tuyaux de cuivre étirés, également de $0^m,20$ de longueur, et qui avaient été choisis de manière à avoir très-sensiblement le même diamètre. Dans toutes ces expériences, quand l'embouchure était évasée, la contraction à l'origine était sensiblement nulle; car avec un petit ajutage conique de quelques centimètres, la vitesse d'écoulement était exactement celle qui correspondait à la pression. Toutes les expériences satisfont très-exactement à la formule

$$P - p = p \cdot \frac{KL}{D}; \quad \text{d'où} \quad p = P \cdot \frac{1}{1 + \frac{KL}{D}}$$

en prenant $K = 0{,}024$. Lorsque le tuyau de conduite s'appliquait directement sur le grand tuyau de $0^m,12$ de diamètre, la formule qui représentait les expériences était

$$P - p = p\frac{KL}{D} + 0{,}451p; \quad \text{d'où} \quad p = P \cdot \frac{1}{1{,}451 + \frac{KL}{D}}.$$

Ces expériences ont confirmé pleinement l'exactitude de la formule employée, ainsi que la valeur du coefficient $K = 0{,}024$.

414. *Expériences de M. Weisbach.* — M. Weisbach se sert, pour représenter la vitesse d'écoulement dans les longues conduites de la formule U dont il multiplie le second terme par $\frac{1}{\sqrt{1 + \zeta + \lambda \frac{L}{D}}}$ dans laquelle ζ représente $\frac{1}{\varphi^2} - 1$ et λ remplace le coefficient K.

M. Weisbach a trouvé que le coefficient λ ou K diminue quand la vitesse augmente.

Il a aussi constaté qu'il varie avec le diamètre des tubes employés, et avec la nature de ces tubes. Avec un tuyau de laiton de $0^m,01$ de diamètre et de 2 mètres de longueur, pour des vitesses comprises entre 25 mètres et 105 mètres, K varie de 0,027258 à 0,014821. Pour un tuyau de verre de même dimension, et dans les mêmes limites de vitesse, K varie de 0,027378 à 0,013898. Pour un tuyau en laiton de $0^m,0141$ de diamètre, K varie de 0,025777 à 0,012137. Pour un tuyau de verre de même diamètre, K varie de 0,026626 à 0,009408. Pour un tuyau de zinc de 0,024 de diamètre et de $10^m,00$

de longueur avec des vitesses comprises entre 25 et 80 mètres, K varie de 0,02302 à 0,012956.

415. *Expériences de MM. Arson, Monard et Honoré* (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1868). — M. Arson, ingénieur en chef de la Compagnie parisienne de chauffage et d'éclairage par le gaz, et MM. Monard et Honoré, tous trois anciens élèves de l'École centrale, ont fait sur l'écoulement des gaz dans les conduites de grand diamètre des expériences d'une très-haute valeur. Dans toutes les expériences faites, le gaz ou l'air était lancé dans la conduite au moyen d'un gazomètre.

Les premières expériences furent faites au moyen d'un gazomètre de l'usine de Saint-Mandé de 15,000 mètres cubes de capacité qu'on remplissait d'air au moyen d'un exhausteur du système Béal, mû par une locomobile.

Ces expériences portèrent sur des conduites de $0^m,50$ et $0^m,325$ de diamètre, posées sur le sol en ligne droite et sur une longueur de 100 mètres. La dépense était déterminée par l'observation de la quantité dont le gazomètre était descendu; la détermination des pressions et des températures se faisait en trois points de la longueur soumise à l'expérience, au départ, au milieu et à l'extrémité; la longueur soumise à l'expérience ne comprenait que la partie droite des tuyaux afin de n'avoir à tenir compte, ni de la perte de charge due à l'entrée dans la conduite, ni des pertes de charge dues aux coudes.

Pour des conduites de diamètre inférieur aux précédents, la détermination des volumes au moyen de l'observation du gazomètre donnait de grandes irrégularités; on fit les expériences relatives aux plus faibles diamètres en employant comme moteur de l'air un gazomètre de l'usine de la Villette, seulement les volumes écoulés furent mesurés au moyen de compteurs à gaz que l'air sortant de la conduite venait traverser. Les conduites étaient posées en ligne droite, et sur un terrain parfaitement nivelé. Les pressions étaient mesurées au moyen du manomètre de M. Brunt, qui permet de les obtenir à moins d'un centième de millimètre d'eau.

416. M. Arson a vérifié d'abord que, pendant l'écoulement du gaz à l'état de régime, la pression est la même dans tous les points d'une même section. Attribuant, d'après M. Belanger, les différences qu'on avait observées à cet égard à ce que les filets gazeux se recourbent au contact du tuyau qu'on fait pénétrer dans la conduite pour en obtenir la pression, et ne peuvent plus dès lors exercer, à l'orifice du tuyau du manomètre, la pression exacte de régime, M. Arson ter-

mine le tuyau du manomètre par un disque de 5 centimètres de diamètre, de façon à éliminer l'influence du tuyau du manomètre; dans ces conditions, on observe en tous les points d'une conduite de $0^m,50$ de diamètre la même pression sous une vitesse qui dépasse 12 mètres par seconde.

Dans toutes les expériences, la température du gaz a été constante pendant toute la durée de l'observation.

417. M. Arson s'est servi pour le calcul de ses expériences de la formule de M. Belanger, établie en supposant que la température reste constante dans toute la conduite et que le gaz suit la loi de Mariotte quant à la variation du volume et de la pression pendant l'écoulement, de plus cette formule suppose que la résistance longitudinale du tuyau est proportionnelle à la densité du gaz, à la circonférence de la conduite et à une fonction du second degré de la vitesse, $aU + bU^2$.

Cette formule est la suivante :

$$\frac{u_0^2}{2g}\left(\frac{8bgL}{D} + 4{,}6052 \log \frac{P_0}{P_1}\right) = \frac{K}{2}\left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2\right] - \frac{4L}{D} a u_0 \frac{P_0 + P_1}{2P_0}$$

dans laquelle

u_0 représente la vitesse du gaz au commencement de la conduite,
P_0 la pression au commencement de la conduite,
P_1 la pression à la fin de la conduite,
L la longueur de la conduite,
D son diamètre,
$g = 9^m,8088$,
$K = \frac{7955}{\delta}(1 + at)$,
δ est la densité du gaz par rapport à l'air.

Si l'on pose pour abréger :

$$\frac{u_0^2}{2g} \cdot \frac{8bgL}{D} = Ab,$$
$$\frac{4L}{D} a u_0 \frac{P_0 + P_1}{2P_0} = Ba,$$
$$\frac{u_0^2}{2g} 4{,}6052 \log \frac{P_0}{P_1} = C,$$
$$\frac{K}{2}\left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2\right] = D,$$

la formule devient :

$$Ab + Ba + C = D,$$
$$Ab + Ba = D - C = E.$$

Une autre expérience donnera :

$$A'b + B'a = E',$$

d'où on déduira

$$b = \frac{E'B - B'E}{A'B - B'A}$$

et

$$a = \frac{E - AB}{B}.$$

On peut ainsi déterminer les valeurs a et b des coefficients de frottement.

Les résultats du calcul sont consignés au tableau suivant :

DIAMÈTRE de la CONDUITE.	NOMBRE des EXPÉRIENCES.	VALEUR DE a.	VALEUR DE b.	NATURE DE LA CONDUITE.
0m,500	27	0,000020	0.000246	Fonte.
0m,325	31	0,000151	0,000326	—
0m,254	4	0,000237	0,000359	—
0m,103	7	0,000560	0,000480	—
0m.081	10	0,000589	0,000489	—
0m,050	5	0,000702	0,000595	—
0m,050	4	0,000738	0,000345	Fer-blanc.

A l'inspection de ce tableau, on voit que les valeurs de a et de b varient avec les diamètres des conduites ; le coefficient a diminue très-rapidement quand le diamètre augmente à partir de 0,25 pour devenir nul ou du moins complétement négligeable au delà de 0m,50 de diamètre ; quant au coefficient b, il diminue aussi quand le diamètre augmente et varie à très-peu près en raison inverse de la racine cubique du diamètre.

Les nombres des deux dernières lignes horizontales du tableau mettent bien en évidence l'influence de la nature des surfaces frottantes.

418. M. Arson a joint à son travail des tables qui donnent pour un diamètre déterminé de conduite et pour une dépense déterminée, ou ce qui revient au même, pour une vitesse donnée, la valeur de la différence des pressions pour une longueur de 1000 m. de conduite.

Pour calculer ces tables, on a simplifié la formule donnée plus haut en supposant le gaz comme inextensible, ce qui fait disparaître

le terme relatif à l'élasticité du gaz et réduit la formule à la suivante :

$$\frac{4L}{D} bu^2 = \frac{K}{2}\left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2\right] - \frac{4L}{D} au \frac{P_0 + P_1}{2P_0},$$

et si l'on pose $P_1 = P_0 - p$, il vient :

$$\frac{4L}{D} bu^2 = \frac{K}{2}\left[\frac{2p}{P_0} - \frac{p^2}{P_0^2}\right] - \frac{4L}{D} au \left(1 - \frac{p}{2P_0}\right),$$

et négligeant les termes $\frac{p^2}{P_0^2}$ et $\frac{p}{2P_0}$, qui sont évidemment très-petits par rapport aux termes dont ils doivent être retranchés, on trouve :

$$\frac{4L}{D}(au + bu^2) = \frac{Kp}{P_0};$$

et comme $K = \frac{P_0}{\pi}$, π étant la densité du gaz, il vient :

$$p = \frac{4L}{D}\pi(au + bu^2);$$

formule très-simple et qui donne immédiatement la différence des pressions pour une vitesse donnée.

419. Nous pouvons modifier cette formule de façon à la mettre sous une forme analogue à celles que nous avons étudiées précédemment ; pour cela, remarquons que l'on a :

$$\frac{p}{\pi} = \frac{4L}{D}(au + bu^2);$$

or, $\frac{p}{\pi}$ est précisément la différence de pression exprimée en hauteur du gaz, valeur que nous avons jusqu'ici représentée par P ; on aura donc :

$$P = \frac{4L}{D} u^2 \left(\frac{a}{u} + b\right),$$

d'où

$$u^2 = \frac{PD}{4L\left(\frac{a}{u} + b\right)} = \frac{gPD}{4Lg\left(\frac{a}{u} + b\right)}.$$

Si nous posons :

$$K = 8g\left(\frac{a}{u} + b\right),$$

il viendra :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{PD}{KL};$$

ou, si nous représentons par p la pression relative à la vitesse u :

$$p = \frac{PD}{KL},$$

formule identique avec celle qui avait été proposée par Girard ; ici seulement le coefficient K est variable avec la valeur de la vitesse ; mais quand cette dernière devient très-grande, le terme $\frac{a}{u}$ devient négligeable et les coefficients des deux formules doivent devenir très-sensiblement égaux.

420. *Examen des formules trouvées par l'expérience pour l'écoulement des gaz dans les tuyaux de conduite.* — La charge correspondante à la vitesse d'écoulement est, d'après les expériences de Girard :

$$p = P \cdot \frac{1}{\frac{KL}{D}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (a)$$

d'après celles de d'Aubuisson,

$$p = P \cdot \frac{1}{1 + \frac{KL}{D}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (b)$$

d'après les expériences de M. Poncelet d'une part, et de M. Weisbach d'autre part,

$$p = P \cdot \frac{1}{1 + A + \frac{KL}{D}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (c)$$

et enfin d'après les expériences de MM. Arson, Monard et Honoré,

$$p = P \cdot \frac{1}{\frac{KL}{D}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (d)$$

La formule de d'Aubuisson (b) ne diffère de celle de M. Poncelet (c) que par le terme A, qui ne s'y trouve pas, et on en conçoit facilement la raison, par cette circonstance que, dans les expériences de cet ingénieur, le tuyau d'écoulement communiquait, à son origine,

avec le réservoir par une embouchure conique qui faisait disparaître la contraction.

Quant à la formule de Girard (*a*), elle diffère de la formule (*c*) de M. Poncelet par le terme $1 + A$ qui ne s'y trouve pas ; mais il est facile de reconnaître, en examinant les circonstances dans lesquelles ces expériences ont été faites, que la valeur de $1 + A$ était tout à fait sans influence. Pour les tuyaux de fonte, la plus petite longueur a été de 128m,80, ce qui donne 28,8 pour la valeur de KL : D ; dans celles qui ont été faites avec des canons de fusil, la plus petite longueur a été de 37 m., ce qui donne 96,2 pour la valeur de KL : D ; or, comme $1 + A$ devait peu différer de 1,45, on voit que, dans les circonstances les plus défavorables, les dénominateurs de la valeur de p dans l'équation (*c*) auraient été $28,8 + 1,45$ et $96,2 + 1,45$ au lieu de 28,8 et de 96,2. et par suite les rapports des vitesses obtenues par les formules (*a*) et (*c*) sont $\sqrt{\frac{30,25}{28,8}} = 1,027$; et $\sqrt{\frac{97,65}{96,2}} = 1,007$. Ainsi, dans les circonstances des expériences, les vitesses données par (*a*) et (*c*) ne diffèrent que de quantités qui sont certainement comprises dans les limites d'erreurs d'expériences aussi délicates.

La formule de M. Arson pouvant être rendue identique, quant à sa forme, à celle de Girard, les observations que nous avons présentées relativement à celle-ci, s'appliquent aussi à celle-là.

On peut donc considérer comme parfaitement établi par toutes les expériences de Girard, de d'Aubuisson, de M. Poncelet, de M. Weisbach et de M. Arson, que la perte de charge due au frottement, abstraction faite de la résistance à l'embouchure, est donnée par la formule

$$P - p = p \frac{KL}{D}.$$

421. Quant à la valeur de K, d'après les expériences de d'Aubuisson et celles de Péclet, elle est sensiblement égale à 0,024 ; d'après M. Poncelet, la valeur de K est sensiblement la même pour les tuyaux de plomb ; d'après Girard, elle serait de 0,0181 pour les tuyaux de fonte et de 0,026 pour les tuyaux de fer ; enfin, d'après M. Weisbach d'une part, et M. Arson de l'autre, cette valeur varie avec la vitesse du gaz, la nature et le diamètre de la conduite.

Les valeurs trouvées par Girard sont tout à fait en désaccord avec celles qui ont été déterminées par M. Arson : en effet, pour un tuyau

de fonte de $0^m,081$, ce qui est le cas des expériences de Girard, le tableau de M. Arson fournit

$$K = 8g\left(\frac{0,000589}{u} + 0,000489\right)$$

ou

$$K = \frac{8g \times 0,000589}{u} + 0,03837;$$

et si on néglige le terme qui contient u, on a encore pour K une valeur qui est plus du double de celle trouvée par Girard.

Les expériences de d'Aubuisson et celles de Péclet ont été faites sur des tubes en fer-blanc ; or, d'après M. Arson, on trouverait pour le fer-blanc :

$$K = 8g\left(\frac{0,000738}{u} + 0,000345\right),$$

et en négligeant le terme en u, $K = 0,0276$, nombre qui ne diffère pas notablement de celui qui a été indiqué par d'Aubuisson, ni de celui que donne M. Weisbach pour les faibles pressions.

422. Il y a lieu de remarquer que la valeur des constantes a et b indiquées par M. Arson ne se maintiendrait plus et devrait être modifiée quand on arrive aux vitesses très-considérables, si on s'en rapporte aux expériences de M. Weisbach ; ce dernier a trouvé en effet que le coefficient K varie du double au simple pour des valeurs de la vitesse comprisesentre 25 m. et 105 m. En admettant l'exactitude de ces dernières expériences, on serait amené à supposer que K varie avec la vitesse suivant une autre loi que celle qui a été indiquée. Mais il ne faut pas oublier que la formule employée par M. Weisbach est celle qui est déduite de la théorie mécanique de la chaleur et que la variation du coefficient peut tenir à la forme même de l'expression qui représente la vitesse ; on peut constater en effet que la variation du coefficient K et celle du coefficient φ modifient la valeur de la vitesse dans le même sens pour le cas des hautes pressions.

La formule

$$P - p = p\,\frac{KL}{D}$$

donne

$$v^2 = 2gP\,\frac{1}{1 + \frac{KL}{D}}, \qquad \text{ou} \qquad v = V\sqrt{\frac{1}{1 + \frac{KL}{D}}},$$

en appelant V la vitesse théorique. Mais à quel gaz se rapporte cette vitesse ? Est-ce au gaz comprimé ou au gaz en totalité ou en partie détendu ?

D'après les expériences de Girard et d'après celles de M. Arson, comme la pression était très-faible, la vitesse peut être considérée comme appartenant ou au gaz comprimé ou au gaz détendu.

Dans les expériences de d'Aubuisson, les pressions observées étaient celles du gaz détendu par le frottement, dans un tuyau d'un diamètre plus grand que celui de l'orifice d'écoulement; mais la vitesse se rapporte à l'air supposé au degré de pression qu'il avait dans le réservoir.

Dans les expériences de M. Weisbach, les vitesses étaient rapportées à l'air considéré sous la pression extérieure.

Enfin, dans celles de M. Poncelet, la vitesse se rapporte d'une manière très-nette au gaz comprimé ; et, comme dans d'autres expériences de M. Pecqueur qui satisfont également à la formule, les excès de pressions se sont élevés jusqu'à 2 atmosphères et demie, on doit considérer la formule comme donnant la vitesse d'écoulement du gaz comprimé, du moins jusqu'à la limite de pression de ces dernières expériences.

423. D'après cela, en désignant par S la section du tuyau, et par Q et Q', les volumes de gaz écoulés et mesurés à la pression $P+b$ et à la pression atmosphérique b, on aura :

$$Q = Sv = S\sqrt{\frac{2gP}{1+\frac{KL}{D}}} \qquad \text{et} \qquad Q' = \frac{P+b}{b}\cdot S\sqrt{\frac{2gP}{1+\frac{KL}{D}}}.$$

424. Pour l'écoulement de l'eau dans des tuyaux cylindriques, on a, d'après d'Aubuisson,

$$P - \frac{v^2}{2g} = 0{,}0208\,\frac{v^2L}{2gD} + 0{,}0000783v\,.\,\frac{L}{D}.$$

Ainsi, la perte de charge est composée de deux parties, l'une est proportionnelle au carré, l'autre à la première puissance de la vitesse; mais le coefficient numérique de cette dernière partie étant très-petit, ce terme est sans influence sensible quand la vitesse est un peu considérable ; par exemple, pour $v = 1^m$, le second terme est à peu près 18 fois plus petit que le premier.

425. D'après ce qui précède, on peut admettre que dans les cas ordinaires de la pratique, l'écoulement des gaz par des orifices en

mince paroi et dans des tubes cylindriques, se fait sous le rapport de la dépense, comme pour des liquides de même densité ; seulement le coefficient de contraction et celui de frottement sont un peu différents, et peuvent varier quand la vitesse du gaz, sa pression et le diamètre de la conduite changent de valeur.

Dans le cas des tuyaux, la section restant constante, ce que nous avons toujours supposé, la vitesse moyenne d'écoulement d'un liquide est la même dans toutes les sections, du moins en le considérant comme incompressible. Pour les gaz, il y a au contraire une détente continue, depuis l'origine jusqu'à l'extrémité du tuyau, et par suite un accroissement correspondant de vitesse ; en outre, la détente qui se produit pendant l'écoulement est nécessairement accompagnée d'un refroidissement et d'une variation de densité qui compliquent singulièrement les phénomènes.

Dans les expériences de Girard, l'excès de pression étant très-faible, la détente et par suite le refroidissement étaient insensibles.

Dans celles de d'Aubuisson, la pression n'ayant jamais dépassé 0,06 d'atmosphère, le refroidissement a encore été insensible.

Dans celles de M. Poncelet, la détente pour le tuyau de 18^{m} était au plus de 0,15 d'atmosphère ; et, comme les expériences ont été de courte durée, la masse du tuyau a dû maintenir la température. Ainsi, dans toutes ces expériences, le refroidissement n'a pas pu se manifester, parce que la détente a été très-faible, ou parce que les expériences n'ont eu qu'une faible durée. Mais, si l'écoulement avait lieu par de longs tuyaux, sous une grande pression et d'une manière continue, un régime régulier de température s'établirait après un certain temps, et dans chaque point la température dépendrait, non-seulement de la détente, mais encore de l'épaisseur du tuyau, de sa conductibilité, de son étendue, de sa surface, de sa nature et de la température extérieure. On voit combien ces phénomènes sont compliqués ; si l'on considère la forme de l'équation qui donne le refroidissement en fonction de la détente, et, en outre, si on observe que les vitesses des veines élémentaires vont en croissant du centre à la circonférence, comme nous le verrons plus loin, on reconnaîtra aisément que la question de l'écoulement des gaz par de longs tuyaux de conduite, sous de grandes pressions, peut être traitée par le calcul, mais qu'elle doit alors conduire à des résultats que leur complication rend d'un emploi tout à fait impossible dans la pratique. On trouvera à ce sujet dans la *Revue universelle* de M. Cuyper, t. XXVII, un travail du docteur Grashof, traduit par M. Pérard.

426. *Influence du frottement sur la vitesse.* — Pour apprécier l'influence du frottement sur la vitesse d'écoulement des gaz, considérons un tuyau de $0^m,10$ de diamètre ayant successivement pour longueur

1^m 10^m 20^m 30^m 40^m 50^m 100^m 500^m 1000^m

La formule qui donne la vitesse d'écoulement, quand il n'y a pas de perte de charge à l'embouchure du tuyau, est

$$v = \sqrt{\frac{2gP}{1 + \frac{KL}{D}}} = V\sqrt{\frac{1}{1 + \frac{KL}{D}}};$$

P représente l'excès de la pression dans le réservoir sur la pression atmosphérique ; V, la vitesse due à cette charge ; L et D, la longueur et le diamètre du tuyau ; et K, le coefficient de frottement qu'on prendra égal à 0,024. En faisant les calculs pour les différentes longueurs indiquées, on trouve pour les différentes valeurs de la vitesse v :

V. 0,89 V. 0,55 V. 0,41 V. 0,35 V. 031 V. 0,28 V. 0,20 V. 0,09 V. 060

Ainsi l'influence du frottement est très-grande, et il est facile de voir à l'inspection de la formule que les vitesses varient sensiblement comme les racines carrées de D : L, du moins quand les valeurs de $\frac{KL}{D}$ sont assez grandes.

427. Si le canal était formé de plusieurs tuyaux cylindriques ayant des longueurs L′, L″, L‴....., des diamètres D′, D″, D‴....., en désignant par p', p'', p'''..... les charges respectives qui correspondent aux vitesses des gaz dans ces tuyaux, et par L, D et p, la longueur, le diamètre et la charge du tuyau extrême, ou en général de celui dans lequel on veut déterminer la vitesse, la perte totale de charge provenant du frottement sera

$$P - p = \frac{KL'}{D'}p' + \frac{KL''}{D''}p'' = \ldots\ldots\ldots + \frac{KL}{D}p.$$

En admettant que le gaz n'éprouve pas de variations sensibles de densité dans son parcours, ce qui arrive toujours quand la charge P est très-petite, les vitesses dans les différents tuyaux seront en raison inverse des sections, et on aura :

$$p' = p\frac{D^4}{D'^4}; \quad p'' = p\frac{D^4}{D''^4}; \quad p''' = p\frac{D'''^4}{D^4};$$

et la perte provenant du frottement sera :

$$P - p = p\left[\frac{KL'}{D'}\frac{D^4}{D'^4} + \frac{KL''}{D''}\frac{D^4}{D''^4} + \ldots\ldots\ldots + \frac{KL}{D}\right].$$

428. Nous avons supposé dans ce qui précède que le tuyau était cylindrique à base circulaire ; quand la base du cylindre a une autre forme, le frottement ayant lieu sur le contour de chaque section et son effet se répartissant sur la section, on peut admettre que l'expression générale de la perte de charge due au frottement est

$$P - p = \frac{K'CL}{S}p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (a)$$

C étant le contour de la section du canal, et S sa surface. Pour un tuyau circulaire, cette expression devient

$$\frac{4K'\pi DL}{\pi D^2} = \frac{4K'L}{D};$$

et comme pour le même tuyau on avait déjà pour le frottement KL : D, il s'ensuit que $K = 4K'$. Ainsi, pour se servir de l'expression générale *(a)*, il faut prendre pour K′ le quart de K.

429. Il résulte de la formule générale (*a*) que le frottement est le même dans un tuyau cylindrique et dans un tuyau carré circonscrit ; car, dans le premier, le frottement est égal à KL : D, et dans le second à

$$\frac{K}{4} \cdot \frac{L \cdot 4D}{D^2} = \frac{KL}{D}.$$

430. On voit aussi, d'après cette formule, que pour des tuyaux de même section, le frottement croît proportionnellement au contour ; ainsi il est toujours avantageux de donner aux tuyaux de conduite des sections dont les deux dimensions diffèrent peu. Pour faire voir combien la forme de la section a d'influence sur le frottement, comparons deux tuyaux ayant une section commune de $0^{mq},20$, mais dont l'une serait carrée et aurait $0^m,447$ de côté, et dont l'autre serait un rectangle de 1^m, sur $0^m,20$; le contour de la première sera $1^m,788$ et celui de la seconde $2^m,40$.

431. Si le tuyau était conique, l'expression du frottement serait beaucoup plus compliquée. Considérons un tronc de cône AA′BB′ (*fig.*22), dont les diamètres des bases et la hauteur seront représentés par D, D′, H ; posons $D' = mD$, et désignons par p et p' les

charges correspondant aux vitesses de l'air dans les sections AA' et BB' ; nous supposerons que la vitesse de l'air est la même dans tous les points d'une section perpendiculaire à l'axe, et nous rapporterons le frottement à la charge p.

Considérons une tranche d'air très-mince ab perpendiculaire à l'axe et située à une distance x de AA' ; le diamètre de cette tranche sera

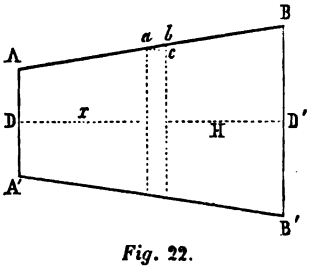


Fig. 22.

$$D + \frac{(D' - D)x}{H} \quad \text{ou} \quad \frac{D(H + (m-1)x)}{H};$$

la surface latérale du petit tronc de cône ab sera dx : cos bac ou dx : cos α, en désignant par α l'angle d'une des arêtes du tronc de cône avec l'axe. En appelant p_1 la charge correspondante à la vitesse de l'air dans le petit élément, le frottement sera

$$\frac{K'C}{S} p_1 = \frac{4K'\pi d}{\cos\alpha \pi d^2} p_1 = \frac{K}{\cos\alpha d} \cdot \frac{D^4}{d^4} p = \frac{pKH^5 dx}{\cos\alpha D(H + (m-1)x)^5}.$$

Par conséquent le frottement dans toute l'étendue du cône tronqué sera l'intégrale de cette expression de 0 à H, c'est-à-dire, en supposant K constant,

$$\frac{KH}{4D\cos\alpha(m-4)} \left(\frac{m^4 - 1}{m^4}\right) p.$$

432. En désignant par L l'arête du cône tronqué, on aurait L cos α = H, et par suite l'expression du frottement deviendrait

$$\frac{KL}{4D} \cdot \frac{m^4 - 1}{m^4(m-1)}; \quad \text{ou} \quad \frac{KL}{4D} \cdot \frac{1}{m-1},$$

en supposant que m soit assez grand pour qu'on puisse négliger l'unité par rapport à m^4. Dans cette dernière supposition, le frottement est le même que celui qui se produirait dans un cylindre ayant une longueur L et un diamètre égal à $4D(m-1) = 4(D' - D)$. Si la valeur de m différait peu de l'unité, on pourrait prendre pour la résistance du cône tronqué celle du cylindre qui aurait même longueur et un diamètre moyen. On obtiendrait ainsi une approximation suffisante pour la pratique, d'autant plus que la supposition sur laquelle la formule générale est fondée, l'égalité de vitesse dans tous

les points d'une même section perpendiculaire à l'axe, n'est point confirmée par l'expérience; la vitesse dans l'axe est toujours plus grande qu'à la circonférence; et par conséquent cette formule donne pour le frottement une valeur qui dépasse la réalité.

433. Lorsque l'écoulement a lieu par des tuyaux qui ne sont ni cylindriques ni coniques, on pourrait calculer le frottement de la même manière que pour les cônes, pourvu que l'on connût l'équation de la génératrice de la surface. Mais l'hypothèse de l'égalité de la vitesse dans tous les points d'une même section s'écarterait souvent beaucoup plus de la réalité que dans les cônes. Au surplus, les tuyaux de conduite sont toujours cylindriques, parce que c'est la forme la plus commode pour la construction, et en même temps la plus économique ; on n'emploie des surfaces différentes que pour des raccordements, où en général la résistance provenant du frottement est très-petite relativement à la résistance totale et peut presque toujours être négligée.

CHAPITRE VI

Changements de direction dans les tuyaux de conduite de gaz.

Nous nous occuperons d'abord de l'influence des changements brusques de direction, et ensuite de celle des changements continus, c'est-à-dire des tuyaux courbes.

434. *Changements brusques de direction.* — M. d'Aubuisson a fait quelques expériences sur l'influence des changements brusques de direction ; voici ce qu'on trouve à ce sujet dans son *Traité d'hydraulique*, page 513 :

« Les coudes des conduites, lorsqu'ils sont brusques et forts, augmentent considérablement la résistance au mouvement : ainsi, dans mes nombreuses expériences sur les conduites coudées, sept angles de 45° ont réduit d'un quart la dépense.

« Dans ces expériences, j'ai vu la résistance croître, de même que pour les conduites menant de l'eau, sensiblement comme le carré de la vitesse, et à peu près comme le carré du sinus des angles ; au delà d'un certain nombre, elle diminuait même : ainsi 15 angles ont un peu moins réduit la dépense que 7 de même grandeur. Ce phénomène et quelques autres circonstances ont rendu vaines les tenta-

tives que j'ai faites pour établir, même approximativement, la résistance des coudes.

« Dans la pratique, on évitera leur mauvais effet, en arrondissant bien ceux qu'on serait obligé de faire. »

435. D'après les expériences faites par Dubuat sur des conduites d'eau, la résistance d'un changement brusque est sensiblement représentée par $p \sin^2 i$, p étant la charge correspondante à la vitesse d'écoulement, et i l'angle du second tuyau avec le prolongement du premier. Pour les gaz qui s'écoulent sous une faible pression, et qui par conséquent n'éprouvent que des variations insensibles de densité, il était très-probable que les résistances des coudes devaient suivre la même loi ; mais il était important de le vérifier, d'autant plus que, dans les expériences de Dubuat, les angles i avaient toujours été compris entre 36° et 56°. Quant à ce résultat singulier trouvé par d'Aubuisson, qu'à partir d'une certaine limite la dépense augmentait avec le nombre des angles, il ne peut s'expliquer qu'en admettant que les joints n'aient pas été rendus parfaitement étanches.

436. Il résulte des nombreuses expériences que j'ai faites sur les changements brusques de direction, que lorsque l'angle i (*fig.* 23) du second tuyau avec le prolongement du premier est compris entre 20° et 90°, la perte de charge est donnée par la formule

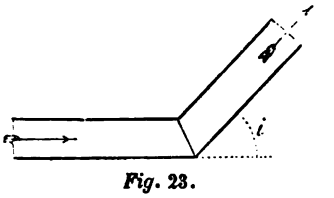


Fig. 23.

$$A_1 - p_1 = p \sin^2 i,$$

comme pour les tuyaux conduisant de l'eau. P_1 est la charge avant le coude ; p_1 la charge après, et p la charge correspondante à la vitesse. Pour les angles compris entre 0° et 20°, il faudra considérer

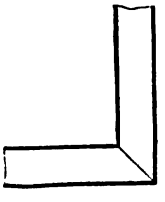


Fig. 24.

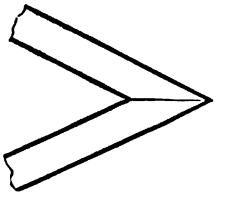


Fig. 25.

le tuyau comme un tuyau courbe, et employer la formule que nous donnerons plus loin.

437. Si l'angle était droit (*fig.* 24), la perte de charge serait p, et pour n changements à angle droit, elle serait np.

438. Pour un angle plus grand (*fig.* 25), la perte de charge présente de l'incertitude. Quelques expériences ont fait voir que, pour des angles du second tuyau avec le prolongement du premier compris entre 110° et 160°, elle variait de $2p$ à $2{,}28p$; mais elles n'ont pas offert assez de régularité pour qu'on puisse leur accorder une très-grande confiance. Du reste, ce cas se présente très-rarement dans la pratique.

439. La résistance totale des changements brusques dans un circuit étant égale à la somme des résistances de chacun d'eux, si l'on

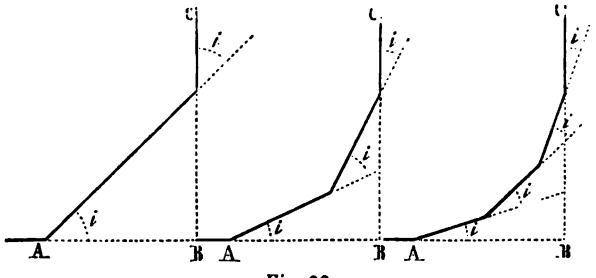


Fig. 26.

imagine qu'un angle droit formé par deux tuyaux AB et BC (*fig.* 26), soit remplacé par 3, 4, 5 tuyaux disposés symétriquement, les angles i seront égaux, leur somme sera égale à 90°; et, en désignant par n le nombre des angles i, la résistance totale sera

$$n \sin^2 \left(\frac{90°}{n}\right).$$

Si on suppose n successivement égal à

1	2	3	4

les valeurs de i seront

90°	45°	30°	22°30′

dont les sinus sont

1	0,707	0,50	0,382

et les pertes de charges deviennent

1	1	0,75	0,53

Ainsi, un seul tuyau coupant l'angle droit ne diminue pas la résistance, et 3 tuyaux intermédiaires la réduisent seulement à peu près à moitié.

440. *Changements continus de direction. Tuyaux courbes.* — La plus ancienne expérience sur l'écoulement des fluides par des tuyaux courbes a été faite par Bossut ; un tuyau de $16^m,24$ de longueur et de $0^m,027$ de diamètre a laissé écouler, sous une charge d'eau de $0^m,325$, un volume de $0^{mc},0208$ d'eau en une minute, quand il était en ligne droite, et $0^{mc},02048$ lorsqu'il était replié sur lui-même de manière à former 6 coudes bien arrondis. Il semblerait, d'après cette expérience, que les coudes arrondis n'ont pas d'influence sur la dépense, mais comme le tuyau était très-long, la perte de charge était en partie dissimulée par celle qui provenait des frottements.

441. Dubuat a fait un grand nombre d'expériences pour déterminer la résistance des coudes arrondis dans les tuyaux de conduite d'eau, et cet ingénieur a été conduit à une singulière explication de la résistance dont il est question. Il admet que, quand de l'eau sort d'un canal rectiligne AB (*fig.* 27), et pénètre dans un canal curviligne BCD, les veines élémentaires ne suivent pas la courbure du tuyau, mais vont se réfléchir sur sa surface, et que la perte de charge produite par le tuyau curviligne est due à ces réflexions des filets d'eau. D'après ses expériences, la perte de charge aurait l'expression suivante :

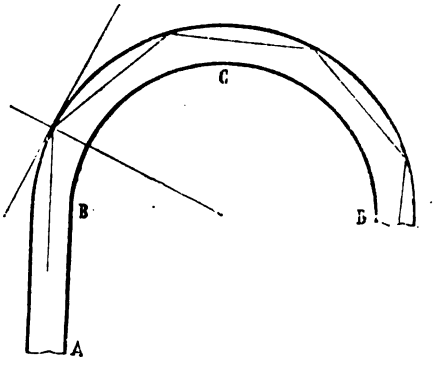


Fig. 27.

$$0{,}0123v^2(s^2+s'^2+s''^2.\ .);\quad \text{ou}\quad p\,.\,0{,}24\,(s^2+s'^2+s''^2\ldots)$$

s, s' s''..... étant les sinus des angles de réflexion. En admettant que la courbure du tuyau soit circulaire, tous les angles de réflexion sont égaux, et l'expression précédente devient $pn \sin^2 i$. Les angles de réflexion sont ceux qui correspondent à la veine centrale. D'Aubuisson admet complétement cette explication de la résistance des tuyaux courbes et la formule de Dubuat (*Traité d'hydraulique*, p. 182).

442. Malgré l'autorité de ces deux ingénieurs, une telle explica-

tion me paraît inadmissible : d'abord, les fluides, liquides ou gaz, ne se réfléchissent pas contre les surfaces qu'ils rencontrent; en second lieu, si cette réflexion se manifestait, elle ne serait pas la même pour toutes les veines élémentaires qui pénètrent dans le tuyau curviligne, et pour chacune d'elles les valeurs de i et de n seraient différentes.

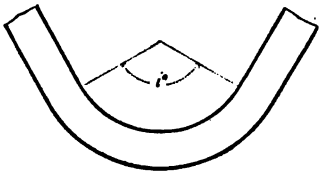


Fig. 28.

443. J'ai fait un grand nombre d'expériences pour déterminer la perte de charge provenant des coudes arrondis (*fig.* 28), et il en résulte qu'on s'éloignera peu de la vérité en admettant que la résistance d'un tuyau courbe d'une section constante est sensiblement égale à

$$P_1 - p_1 = \frac{i^\circ}{180^\circ} p,$$

i étant le nombre de degrés de l'arc, p la charge correspondante à la vitesse d'écoulement, P_1 et p_1 la charge avant et après la courbure.

444. Ainsi, pour un demi-cercle qui ramènerait le tuyau dans une position parallèle à la direction initiale (*fig.* 29), on aurait $i^\circ = 180^\circ$, et la perte de charge serait p, moitié seulement de celle qui aurait

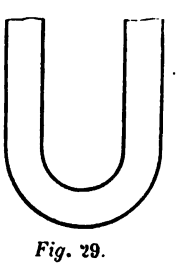


Fig. 29.

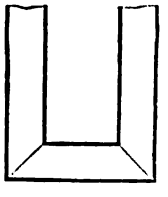


Fig. 30.

lieu si le tuyau avait pris cette direction par deux changements brusques et successifs d'un angle droit chacun (*fig.* 30).

S'il y avait n changements continus de direction, la perte de la charge serait $P_1 - p_1 = \frac{i^\circ}{180^\circ} p$.

CHAPITRE VII

Changements de section dans les tuyaux de conduite de gaz.

Nous examinerons successivement l'influence des accroissements brusques et continus de section, puis l'influence des décroissements brusques et continus.

445. *Accroissement brusque de section.* — Lorsqu'un gaz s'écoule par un tuyau cylindrique dont la section augmente brusquement (*fig.* 31) en un certain point, le gaz immobile, qui au premier instant enveloppait la veine de gaz pénétrant dans le second tuyau, est entraîné, et il en résulte autour de la veine une diminution de pression qui augmente la vitesse d'écoulement dans le premier tuyau. D'un autre côté, à une certaine distance du changement de section, la veine de gaz occupe toute la section du grand tuyau; et comme la densité n'a pas changé sensiblement quand l'écoulement se fait sous de faibles pressions, la vitesse doit nécessairement être plus faible que dans le premier tuyau, et il y a une perte de charge qui dépend du rapport des sections.

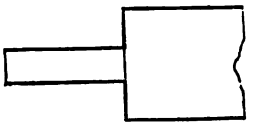


Fig. 31.

446. Occupons-nous d'abord de l'accroissement de charge qui résulte de la diminution de pression autour de la veine. En appelant v la vitesse qu'aurait le gaz dans le premier tuyau s'il débouchait dans l'atmosphère, et V la vitesse moyenne dans ce premier tuyau, dans le cas de l'accroissement de section, on a $V = \psi v$, ψ étant un coefficient de correction plus grand que l'unité. Il en résulte une variation de charge $P_1 - p$, donnée par la formule

$$P_1 - p = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1\right) p = - Bp.$$

P_1 serait la charge s'il n'y avait pas accroissement de section, et p est la charge correspondante à la vitesse v dans le petit tuyau. Le coefficient ψ étant plus grand que l'unité, le second membre est nécessairement négatif. Voici, d'après mes expériences, pour les différents rapports de diamètre, les valeurs de ψ et les coefficients B de variation de charge correspondants :

Rapports des diamètres.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Valeurs de ψ	1,01	1,04	1,10	1,17	1,27	1,37	1,33	1,13	1,10	1
Valeurs de $B = 1 - \frac{1}{\psi^2}$	0,02	0,08	0,17	0,27	0,38	0,47	0,43	0,22	0,17	0

Ainsi il y a un maximum d'effet pour un accroissement brusque de section correspondant à peu près au rapport 0,6.

447. Examinons maintenant la perte de charge résultant de la diminution de vitesse dans le second tuyau. Les volumes écoulés par chaque section étant évidemment les mêmes, puisqu'on suppose que la densité du gaz varie fort peu, il en résulte

$$\frac{V}{V_1} = \frac{D_1^2}{D_2} \qquad \text{d'où} \qquad \frac{p}{p_1} = \frac{D_1^4}{D^4},$$

et par suite :

$$p - p_1 = p\left(1 - \frac{D^4}{D_1^4}\right) = p_1\left(\frac{D_1^4}{D^4} - 1\right).$$

Dans ces formules, p et v sont la charge et la vitesse dans le premier tuyau de diamètre D ; p_1 et v_1, la charge et la vitesse dans le second tuyau de diamètre D_1.

448. En somme, la variation totale de charge produite par un accroissement brusque de section est exprimée par la formule

$$P_1 - p_1 = p\left(-B + 1 - \frac{D^4}{D_1^4}\right).$$

449. Pour que les phénomènes dont nous venons de parler puissent se produire, il est nécessaire que le second tuyau ait une certaine longueur, et il résulte des expériences que la longueur minimum est donnée par la formule

$$L = 6{,}5\,(D_1 - D).$$

450. En partant des résultats d'expérience, on pourrait, en traçant des courbes, obtenir les valeurs approximatives des accroissements de vitesse qui correspondent aux différents rapports de section ou de diamètre. Mais il est bon d'essayer si, par des considérations théoriques, on peut arriver à une formule qui représente les accroissements de vitesse et qui s'accorde avec l'expérience. Ce calcul a été fait pour les conduites d'eau par M. Belanger au moyen de l'équation des quantités de mouvement. Lorsqu'un corps est sollicité par des forces dirigées dans le sens du mouvement, en désignant par m sa masse, par v' et v'' ses vitesses à deux époques différentes du mou-

vement, et par F la force estimée en kilogrammes qui agit sur lui, on a $mv' - mv'' = \int F dt$, l'intégrale étant prise entre les limites qui correspondent aux vitesses v' et v''. Pour appliquer ce principe au cas dont il s'agit, supposons qu'un fluide qui ne change pas sensiblement de densité dans son mouvement, s'écoule par un petit tuyau qui s'élargit brusquement; admettons que le fluide se détende immédiatement à l'entrée du second tuyau; à une certaine distance, le mouvement deviendra régulier. Supposons que les vitesses soient les mêmes dans tous les points d'une même section du tuyau d'aval et à une certaine distance dans le tuyau d'amont. En désignant par m la masse du gaz qui s'écoule pendant un temps très-petit θ, en aval et en amont, à la distance où le mouvement devient régulier, l'accroissement de la quantité de mouvement sera $mv'' - mv'$, et la force correspondante sera $p_1 s''$, en désignant par s'' la section et par p_1 la détente produite par l'accroissement de section estimée en poids et en admettant que cette détente ait disparu au point du tuyau que nous considérons; on aura alors

$$mv'' - mv' = -p_1 s'' \theta; \quad \text{ou} \quad m(v'' - v') = -p_1 s'' \theta \ldots\ldots\ (a)$$

Le second membre de l'équation est affecté du signe moins, parce que le premier est évidemment négatif. Si nous désignons par s' la section du premier tuyau, et par π le poids d'un mètre cube du fluide qui s'écoule, nous aurons $m = sv'\pi\theta : g$; et comme $v''s'' = v's'$, l'équation précédente devient

$$\frac{v'^2}{g}(s'^2 - s's'') = -\frac{p_1 s''^2}{\pi};$$

la charge p_1 étant estimée en poids, si nous désignons par p' la même charge estimée en hauteur du fluide, nous aurons $p' = \frac{\pi}{P_1}$, et par suite l'équation se réduit à

$$\frac{v'^2}{g}(s'^2 - s's'') = -p's''^2;$$

mais comme $v'^2 : 2g$ représente la charge en hauteur de gaz qui correspond à la vitesse effective dans le premier tuyau, et que cette charge est égale à $P + p'$, la dernière équation devient

$$2(P + p')(s'^2 - s's'') = -p's''^2,$$

d'où

$$p' = \mathrm{P}\,\frac{-2(s'^2 - s's'')}{s''^2 + 2(s'^2 - s's'')};$$

et si l'on pose $\frac{s''}{s} = n$, la valeur de p' devient enfin :

$$p' = \mathrm{P}\,\frac{-2(1-n)}{n^2 + 2(1-n)};$$

on tire de là

$$\mathrm{P} + p' = \frac{n^2}{n^2 + 2 - 2n} \cdot \mathrm{P},$$

d'où

$$\mathrm{V}' = \sqrt{2g\mathrm{P}\,\frac{n^2}{n^2 + 2 - 2n}},$$

et enfin

$$\frac{v'}{\mathrm{V}} = \sqrt{\frac{n^2}{n^2 + 2 - 2n}}.$$

La valeur de p' a un maximum qui correspond à $n = 2$, ce qui fournit $p' = -\mathrm{P}$ et par suite $v' = 1{,}41\,\mathrm{V}$; V étant égal à $\sqrt{2g\mathrm{P}}$. Ce résultat ne s'accorde pas exactement avec l'expérience, car dans toutes les séries d'observations que j'ai faites, le maximum correspond à un rapport des sections compris entre 2 et 3 et la vitesse maximum n'a jamais dépassé 1,37 V; de plus, si l'on compare les valeurs de v' obtenues au moyen de la dernière formule avec celles que fournit l'observation, on trouve que, surtout pour les variations de sections qui sont voisines du maximum, les résultats ne présentent pas un accord suffisant.

Il serait possible que pour les expériences qui s'approchent du maximum, la résistance dans le tuyau fût plus grande que celle qui résulte du frottement, mais il est impossible de le reconnaître. Il ne me paraît pas douteux que les différences dont il s'agit proviennent de l'inexactitude des hypothèses admises pour établir la formule, savoir : la détente totale immédiate à l'extrémité du petit tuyau, et l'égalité de vitesse dans tous les points de la veine qui s'échappe par le grand tuyau ; cette dernière supposition ne se vérifie jamais.

Quoique la formule ne s'accorde pas d'une manière satisfaisante avec l'expérience, on pourrait cependant l'admettre comme donnant

des résultats suffisamment approchés dans le plus grand nombre des cas, surtout quand les tuyaux de conduite ont une grande longueur ; mais comme il est plus commode, au lieu de formules générales qui exigent des calculs, d'avoir des tableaux donnant les éléments dont on a besoin, j'ai préféré, dans la formation du tableau relatif à la question qui nous occupe, partir des résultats de l'observation en traçant des courbes et prenant les nombres qui présentent la plus grande probabilité d'exactitude, surtout d'après la durée des expériences. C'est ainsi que j'ai formé le tableau précédent, qui contient les accroissements de vitesses et les valeurs de B, c'est-à-dire les accroissements de charge provenant de la détente.

Dans les traités d'hydraulique, l'accroissement de charge résultant d'un accroissement brusque de section est représenté par une expression très-simple, qui se déduit de l'équation relative aux quantités de mouvement, et qui est :

$$\frac{(v' - v'')^2}{2g}.$$

Ainsi l'accroissement de charge se trouve représenté d'une manière très-simple au moyen des vitesses d'amont et d'aval. Mais l'équation d'où ces expressions ont été déduites ne s'accorde pas avec l'expérience, et en supposant même que ces expressions soient exactes, elles ne pourraient servir à rien, car ces vitesses, étant modifiées par la détente, ne pourraient être connues que par l'observation, ou en calculant leurs valeurs au moyen de la valeur générale de p'.

451. Si un canal était formé de plusieurs tuyaux (*fig.* 32) ayant des diamètres croissants D_1, D_2, D_3,.... D, et des longueurs L_1, L_2, L_3,.... L, en désignant les charges correspondantes aux vitesses dans les tuyaux par p_1, p_2, p_3,.... p, et par P la charge à l'entrée du premier tuyau, les pertes de charge successives seraient $P - p_1$, $p_1 - p_2$ ..... $p_n - p$, leur somme serait $P - p$, et la perte totale serait donnée par la formule

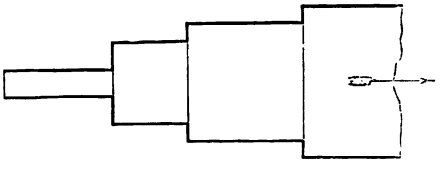


Fig. 32.

$$P - p = \left(\frac{KL_1}{D_1} - B_1 + 1 - \frac{D_1^4}{D_2^4}\right) p_1 + \left(\frac{KL_2}{D_2} - B_2 + 1 - \frac{D_2^4}{D_3^4}\right) p_2 \ldots + \frac{KL}{D} p.$$

452. On peut exprimer la perte de charge $P - p$ en fonction de la seule charge p et des dimensions des tuyaux, au moyen de la relation $\frac{p}{p_1} = \frac{D_1^4}{D^4}$; et la formule devient

$$P - p = \left[\left(\frac{KL_1}{D_1} - B_1 + 1 - \frac{D_1^4}{D_2^4}\right)\frac{D_1^4}{D^4} + \left(\frac{KL_2}{D_2} - B_2 + 1 - \frac{D_2^4}{D_3^4}\right)\frac{D_2^4}{D^4} \ldots + \frac{KL}{D}\right]p.$$

Il est facile, au moyen de cette formule, de trouver la valeur de p en fonction de la charge à l'entrée, et par suite de connaître la vitesse d'écoulement à l'extrémité du tuyau.

453. *Accroissement continu de section* (*fig.* 33). — Lorsque deux tuyaux cylindriques de diamètres différents sont raccordés par un cône tronqué, et que le gaz se dirige du plus petit dans le plus grand, l'effet produit par le changement de section est sensiblement le même que si le cône débouchait dans l'atmosphère, pourvu que la longueur du tronc de cône soit suffisante, c'est-à-dire qu'il y ait dans le premier tuyau un accroissement de vitesse qui varie avec l'angle du cône. Le tableau suivant donne, d'après mes expériences, le coefficient ψ de correction de la vitesse et le coefficient B d'accroissement de charge, pour les différents angles au sommet du tronc de cône.

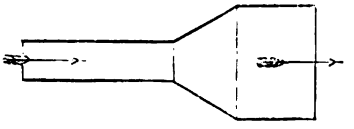


Fig. 33.

ANGLES.	VALEURS DE		ANGLES.	VALEURS DE	
	ψ	$B = 1 - \frac{1}{\psi^2}$		ψ	$B = 1 - \frac{1}{\psi^2}$
0°	1,00	0,00	9°	1,95	0,67
1	1,24	0,35	10	1,50	0,56
2	1,48	0,54	12	1,40	0,49
3	1,70	0,66	16	1,35	0,45
4	1,95	0,71	20	1,30	0,41
5	2,25	0,80	25	1,26	0,37
6	2,40	0,83	30	1,18	0,28
7	2,45	0,83	40	1,08	0,14
8	2,30	0,81	50	1,05	0,10

454. Quant à la perte de charge résultant de la diminution de vitesse dans le second tuyau, elle est évidemment la même que dans le cas d'un accroissement brusque de section.

455. En somme, la variation totale de charge dans le cas d'un accroissement continu de section est donnée par la même formule que pour un accroissement brusque,

$$P_1 - p_1 = p\left(-B + 1 - \frac{D^4}{D_1^4}\right);$$

mais les valeurs de B sont différentes.

456. Si on employait un système de tuyaux composé de troncs de cônes interrompus par des cylindres destinés à éviter les changements brusques de vitesses dans les veines élémentaires, on obtiendrait un accroissement de vitesse qui augmenterait avec le nombre des cônes tronqués, parce que chacun d'eux, en les supposant de même angle au sommet, produirait le même effet ; mais, comme cet accroissement devrait être rapporté à la charge du cylindre précédent, il décroîtrait rapidement à mesure qu'on s'éloignerait du premier cône. En négligeant le frottement dont l'influence va constamment en diminuant, on aurait évidemment

$$P - p = -pB\left(1 + \frac{d^4}{D^4} + \frac{d^4}{D'^4} + \frac{d^4}{D''^4} + \frac{d^4}{D'''^4} + \ldots\ldots\ldots\right);$$

B représentant la charge gagnée par chaque cône ; d, D, D′, D″, D‴,.... les diamètres des cylindres ; P et p la charge correspondante à la vitesse dans le premier tuyau, avant et après l'adjonction des troncs de cône. Si on suppose que les diamètres de ces cylindres croissent dans le même rapport r, on aura

$$\frac{d}{D} = \frac{1}{r}; \quad \frac{D}{D'} = \frac{1}{r}; \quad \frac{D'}{D''} = \frac{1}{r}; \quad \frac{D''}{D'''} = \frac{1}{r}; \quad \ldots.$$

d'où

$$\frac{d}{D'} = \frac{d}{Dr}; \quad \frac{d}{D''} = \frac{d}{Dr^2}; \quad \frac{d}{D'''} = \frac{d}{Dr^3};$$

et

$$P - p = -pB\left(1 + \frac{1}{r^4} = \frac{1}{r^8} + \frac{1}{r^{12}} + \frac{1}{r^{16}} \ldots.\right) =$$
$$-pB\left(1 + \frac{1}{r^4} + \frac{1}{(r^4)^2} + \frac{1}{(r^4)^3} + \frac{1}{(r^4)^4} + \ldots.\right).$$

Si le nombre des tuyaux était infini, on aurait

$$P - p = -pB \cdot \frac{r^4}{r^4 - 1}.$$

Si on suppose $r = 1{,}5$, on aura $r^4 = 5{,}06$, et $P - p = -pB \times 1{,}246$.

Ainsi la charge serait augmentée à peu près d'un quart, et, comme on aurait alors

$$P - p = - pB\,(1 + 0{,}197 + 0{,}0388 + 0{,}00684 + 00{,}144 + \ldots\ldots),$$

on voit que l'influence des cônes successifs décroît avec une grande rapidité. En observant la vitesse d'écoulement de l'air à travers un petit ajutage cylindrique, suivi ensuite successivement de 1, 2, 3 cônes, disposés comme nous venons de le dire, j'ai trouvé, pour les durées des écoulements d'un même volume d'air dans les mêmes circonstances 151″, 132″, 123″, 122″.

457. *Décroissement brusque de section* (*fig.* 34). — Lorsqu'un gaz sous une faible charge passe d'un tuyau dans un autre d'un plus petit diamètre, les pressions des veines élémentaires, qui rencontrent la surface environnant l'orifice du second tuyau, s'éteignent contre cette surface, et la charge du premier se transmet au second sans altération ; ainsi, dans ce cas, abstraction faite de la contraction de la veine, il n'y a point de perte de charge résultant de la diminution de section, mais il y a diminution de dépense.

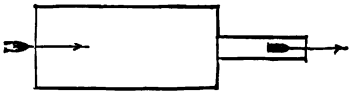


Fig. 34.

458. Quant à la perte de charge due à la contraction, elle est la même que dans le cas d'un ajutage cylindrique placé à l'extrémité d'un tuyau. En appelant P la charge dans le premier tuyau ; p, la charge correspondante à la vitesse d'écoulement dans ce dernier tuyau, et φ, le coefficient de correction de la vitesse, on a

$$P - p = p\left(\frac{1}{\varphi^2} - 1\right) = Ap \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (a)$$

Le tableau suivant donne les valeurs de φ et de A pour les différents rapports de diamètre.

Rapports $\frac{d}{D}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Valeurs de φ	0,83	0,82	0,83	0,84	0,86	0,88	0,91	0,94	0,97	1
Valeurs de A	0,45	0,49	0,45	0,42	0,35	0,29	0,21	0,13	0,06	0

Ces valeurs ne sont réellement que des valeurs approchées, mais elles sont suffisamment exactes pour toutes les applications.

459. Pour apprécier la diminution de dépense qui résulte d'un décroissement de section, supposons qu'un gaz passe d'un tuyau de

diamètre D dans un autre de diamètre 0,1 D. Le volume écoulé par 1″ sera $Q = \frac{\pi D^2}{400}\sqrt{2gp}$. S'il n'y avait pas de décroissement de section, la charge correspondante à la vitesse dans le premier tuyau serait p $(1 + A)$, puisque la perte de charge est Ap ; et le volume écoulé serait $Q_1 = \frac{\pi D^2}{4}\sqrt{2gp\,(1 + A)}$. En prenant le rapport et remplaçant A par sa valeur, on trouve $Q_1 = 120Q$.

460. Lorsqu'un gaz s'écoule par une série de tuyaux de diamètres décroissants (*fig.* 35), la perte de charge, abstraction faite des frot-

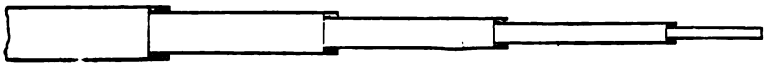


Fig. 35.

tements, est donnée par la formule

$$P - p = A_1 p_1 + A_2 p_2 + \ldots\ldots + Ap,$$

en appelant p_1, p_2..... p les charges correspondantes aux vitesses dans chaque tuyau, et A_1, A_2..... A les diverses valeurs de $\frac{1}{\varphi^2} - 1$.

Lorsque les diamètres sont connus, il est facile d'exprimer p_1, p_2... en fonction de p, et l'expression se réduit à

$$P - p = p\left(A_1 \frac{D_1^4}{D^4} + A_2 \frac{D_2^4}{D^4} + \ldots\ldots + A\right)p.$$

Les diamètres D, D_1, D_2.... correspondent respectivement aux charges p, p_1, p_2.....

461. *Décroissement continu de section.* — Lorsque deux tuyaux cylindriques sont raccordés par un tronc de cône convergent (*fig.* 36), on observe dans l'écoulement du gaz les mêmes phénomènes que dans le cas d'un ajutage conique convergent, et la perte de charge $P - p$ est donnée par la même formule :

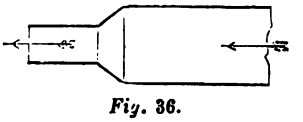


Fig. 36.

$$P - p = \left(\frac{1}{\varphi^2} - 1\right)p = Ap,$$

P et p étant les charges avant et après le tronc de cône. Le coefficient φ de correction doit nécessairement varier avec les angles au sommet du cône, depuis l'unité pour un angle nul, jusqu'à 0,83 pour

un angle de 180°. Le tableau suivant donne pour les différents angles les valeurs des coefficients de correction et de perte de charge.

Angles.....	0°	10°	20°	30°	40°	60°	80°	100°	140°	180°
Valeurs de φ....	1	0,94	0,92	0,90	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83
Valeurs de A....	0	0,13	0,18	0,23	0,29	0,32	0,35	0,38	0,42	0,45

Examinons maintenant l'influence des renflements et des étranglements dans les tuyaux de conduite de gaz.

Fig. 37.

462. *Influence des renflements.* — Considérons un tuyau (*fig.* 37) de diamètre d, ayant sur une certaine longueur l un renflement de diamètre D. Désignons par p la charge correspondante à la vitesse dans le petit tuyau ; la perte de charge par le renflement sera

$$P - p_1 = \left(1 - \frac{d^4}{D^4} - B + A + \frac{Kl}{D}\frac{d^4}{D^4}\right)p.$$

B et A sont les coefficients de variations de charge à l'entrée et à la sortie du renflement, et K le coefficient de frottement. Supposons $l : D = 10$; en donnant successivement au rapport des diamètres les valeurs

0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1,

on trouve que les pertes de charges correspondantes sont

$0{,}40p$ $0{,}60p$ $0{,}60p$ $0{,}72p$ $0{,}93p$ $1{,}13p$ $1{,}27p$ $1{,}41p$ $1{,}43p$;

ainsi on voit que la perte de charge augmente avec le diamètre du renflement. Elle s'approche constamment d'une limite qui est $1{,}45p$.

Si un tuyau avait n renflements (*fig.* 38), dont les diamètres fussent au moins égaux à 10 fois le diamètre du tuyau, la perte totale de charge serait sensiblement $1{,}45np$, c'est-à-dire presque une fois et demie plus grande que s'il y avait n changements brusques de direction à angle droit. L'expérience s'accorde parfaitement avec ce résultat des formules que nous avons établies, mais à la

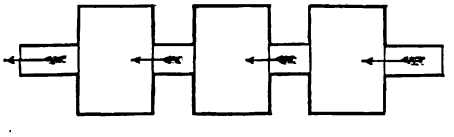


Fig. 38.

condition que le renflement ait une longueur au moins égale à six fois et demie la différence des diamètres.

Il ne faudrait pas conclure de là que les renflements, qui occasionnent toujours une perte de charge, produisent nécessairement une diminution de dépense ; car les rélargissements diminuent le frottement, et il peut arriver que cet effet compense et même dépasse le premier ; il suffit pour cela qu'on ait

$$\frac{Kl}{d} > 1 - \frac{d^4}{D^4} - B + A + \frac{Kl}{D}\frac{d^4}{D^4}.$$

463. *Influence des étranglements dans les tuyaux de conduite.* — Considérons un tuyau de diamètre D, ayant sur une certaine longueur l un étranglement de diamètre d. En appelant p la charge correspondante à la vitesse dans le grand tuyau, la perte de charge sera :

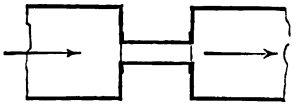


Fig. 39.

$$P - p_1 = \left(1 - \frac{d^4}{D^4} - B + A + \frac{Kl}{D}\right)\frac{D^4}{d^4}p.$$

Il résulte de cette formule que la perte de charge croît indéfiniment à mesure que le diamètre de l'étranglement diminue.

Si les étranglements étaient produits par des diaphragmes (*fig.* 40), les effets seraient évidemment les mêmes, ainsi que la formule qui donne la perte de charge. Il suffirait d'y faire $l = o$, de sorte qu'on aurait :

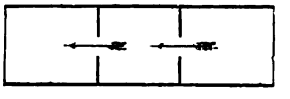


Fig. 40.

$$P - p = \left(1 - \frac{d^4}{D^4} - B + A\right)\frac{D^4}{d^4}p,$$

p étant la charge qui correspond à la vitesse dans le tuyau.

Si les conduits n'étaient pas circulaires, il suffirait dans les calculs précédents de remplacer le rapport des quatrièmes puissances des diamètres par celui du carré des sections.

CHAPITRE VIII

Écoulement des gaz par des tuyaux d'une forme quelconque.

464. *Formules générales de la perte de charge.* — Lorsqu'un gaz s'écoule par un tuyau d'une forme quelconque, il éprouve des résistances de diverses natures ; mais, comme nous l'avons vu, elles sont toutes proportionnelles au carré de la vitesse d'écoulement. Dans les chapitres précédents, nous avons donné la valeur des pertes de charge provenant de chacune de ces résistances séparément, et il est évident que la perte totale de charge est égale à la somme des pertes partielles. La formule relative à l'écoulement des gaz par un tuyau quelconque est

$$P - p = \Sigma \frac{KL}{D} p_1 + \Sigma \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) p_2 + \Sigma A p_3 - \Sigma B p_4 + \Sigma \sin^2 i^\circ p_5 + \Sigma \frac{i^\circ}{180^\circ} p_6 ;$$

P est l'excès de la pression dans le réservoir de gaz sur celle du milieu dans lequel le gaz s'écoule ; p, la charge correspondante à la vitesse à l'extrémité libre de la conduite ; p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, les charges correspondantes aux vitesses dans les divers points où se manifestent les résistances. Le premier terme $\Sigma \frac{KL}{D} p_1$ représente la somme des pertes de charge dues au frottement ; le deuxième, $\Sigma \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) p_2$, la somme des pertes dues aux diminutions de vitesse par accroissement de section ; le troisième, $\Sigma A p_3$, la somme des pertes dues aux contractions par diminution de section ; le quatrième, $\Sigma B p_4$, la somme des accroissements de charge dus aux détentes par accroissement de section ; le cinquième, $\Sigma \sin^2 i^\circ p_5$, et le sixième, $\Sigma \frac{i^\circ}{180^\circ} p_6$, la somme des pertes par les changements brusques et par les changements continus de direction.

Il est facile d'exprimer chacune des charges p_1, p_2,.... p_6 en fonction de p ; car si les vitesses v et v_1 ont lieu dans les tuyaux dont les diamètres sont d et d_1, il est évident, si l'on suppose que le gaz ne change pas sensiblement de densité, que l'on aura

$$p_1 = p \frac{d^4}{d_1^4} ;$$

et de même pour les autres pressions. On peut ainsi mettre la formule générale qui donne la perte totale de charge sous la forme

$$P - p = Rp, \quad p = \frac{P}{1+R} \quad \text{et} \quad v = V\sqrt{\frac{1}{1+R}};$$

R est un nombre qui ne dépend que de la forme et des dimensions du tuyau et qu'on peut calculer *à priori*; v est la vitesse réelle à l'extrémité du tuyau, et V la vitesse théorique due à la charge P.

Il résulte de là une conséquence très-importante : c'est que, pour une même conduite de gaz, la vitesse d'écoulement est toujours, quelle que soit la pression, une même fraction de la vitesse théorique, c'est-à-dire de celle qui aurait lieu, si la conduite ne produisait aucune résistance.

465. Si le gaz, en parcourant une conduite supposée horizontale, éprouvait des variations de température, la vitesse d'écoulement à l'origine ne serait modifiée que par les variations de résistance que produiraient les variations de vitesse provenant des dilatations et des contractions. On en conçoit facilement la raison : les contractions et les détentes qui résultent des variations de température, agissant également dans les deux sens, doit nécessairement se détruire. C'est d'ailleurs un fait que j'ai constaté par des expériences que je rapporterai plus loin. Mais si le circuit n'était point horizontal et si les différentes parties étaient à des températures différentes, la valeur de P éprouverait des modifications dont nous nous occuperons dans le livre suivant.

466. Il est toujours utile de donner aux tuyaux de conduite des gaz une section plus grande que celle qui résulte du calcul, parce qu'il y a toujours, quelques précautions qu'on ait prises, des fuites qu'on ne peut compenser que par un excès de charge qui en occasionne de nouvelles. Pour donner une idée des pertes de gaz par les fuites dans les conduites disposées avec le plus grand soin, je rapporterai les résultats de quelques expériences faites à l'usine à gaz du faubourg Poissonnière. A cette époque, la grande conduite avait $4^m,905$ de longueur et se composait de tuyaux ayant $0^m,216$ et et $0^m,324$ de diamètre. Sous des charges en eau de $0^m,0225$; $0^m,0450$; $0^m,0675$; $0^m,0900$, les pertes par les fissures, déduites de la descente du gazomètre, tous les orifices étant fermés, ont été par heure de $6^{mc},362$; $25^{mc},174$; $34^{mc},428$; $45^{mc},927$. Les pertes doivent nécessairement varier avec la longueur, le diamètre des tuyaux, et principalement avec l'état des jonctions ; mais les observations que nous

venons de citer constatent un fait important et qui doit se reproduire partout : les pertes par les fissures devraient, d'après les lois du mouvement des gaz, augmenter suivant la racine carrée des pressions, tandis que, d'après l'expérience, elles croissent suivant une loi beaucoup plus rapide ; les excès de charge ont varié dans le rapport des nombres 1, 2, 3, 4, dont les racines carrées sont 1 ; 1,417 ; 1,732 ; 2 ; tandis que les pertes sont proportionnelles aux nombres 1 ; 3,78 ; 5,51 ; 7,21 : ce phénomène singulier ne peut s'expliquer qu'en admettant que les fissures très-capillaires ne sont traversées par les gaz que sous des charges d'autant plus grandes qu'elles sont plus petites.

467. *Pressions exercées par les gaz dans les tuyaux de conduite.* — La formule que nous venons d'établir peut être employée, dans le cas de faibles pressions, avec la certitude d'obtenir une approximation suffisante, et comme elle est directement déduite de l'expérience, il n'y pas à se préoccuper, sous le rapport du volume écoulé, des phénomènes qui se produisent dans les tuyaux de conduite. Ces phénomènes sont, comme nous l'avons vu, très-compliqués. J'ai pourtant cherché, dans une série d'expériences, à connaître les faits principaux, surtout dans l'espoir de déduire la vitesse d'écoulement de simples observations manométriques.

Dans toutes les expériences dont je vais rapporter les résultats, je me suis servi du manomètre à eau à tube incliné, qui permettait d'observer un treizième de millimètre d'eau ; les pressions ont été transmises au moyen d'un tube de verre effilé très-fin. Pour observer à l'extrémité du tuyau la pression produite par l'air dans la direction opposée à la vitesse, et que nous appellerons *pression longitudinale*, le petit tube de verre était droit, et on l'enfonçait plus ou moins dans le tuyau parallèlement à son axe. Le fil de verre communiquait avec le manomètre au moyen d'un tube en caoutchouc. Malgré le petit diamètre intérieur du fil de verre qui était souvent inférieur à un cinquième de millimètre, l'indication du manomètre, quand il communiquait avec un réservoir d'air, sous une pression constante, était la même que lorsque la communication avait lieu par un tube d'une grande section ; seulement l'équilibre s'établissait plus lentement.

468. Ce mode d'expérience ne pouvait être employé pour observer les pressions manométriques à de grandes distances de l'extrémité libre du tuyau et dans l'intérieur. Je me suis servi de fils de verre *b* (*fig.* 41) recourbés à angle droit, qu'on introduisait dans des tubu-

lures placées sur le tuyau BC. Ces tubulures ont aussi servi à mesurer la pression contre la surface du tuyau, c'est-à-dire la *pression latérale*, en employant un tube droit *a*, perpendiculaire à la surface intérieure et dont l'extrémité venait affleurer cette surface.

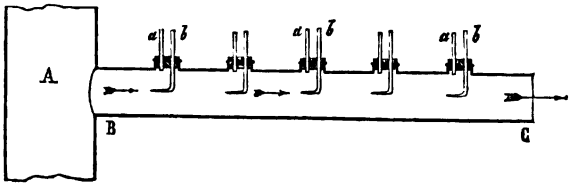


Fig. 41.

469. Voici les principaux résultats de ces expériences :

1° Les pressions longitudinales vont toujours en diminuant, depuis le réservoir de gaz jusqu'à l'extrémité ouverte du tuyau. A l'embouchure, la pression longitudinale est égale à celle du réservoir.

2° La pression longitudinale va en diminuant, du centre du tuyau à la circonférence. Ce résultat, facile à prévoir, est, comme nous l'avons dit, une conséquence naturelle du frottement.

3° A l'extrémité ouverte du tuyau, la pression longitudinale dans l'axe est plus grande que celle qui correspond à la vitesse d'écoulement, et elle est plus faible à la surface du tuyau. La pression longitudinale, à une distance de la surface du tuyau égale au tiers du rayon, est à peu près celle qui correspond à la vitesse d'écoulement.

4° La pression latérale va en diminuant, de l'embouchure à l'extrémité libre du tuyau, où elle est nulle.

5° La différence entre la pression longitudinale, prise à une distance de la surface du tuyau égale au tiers du rayon, et la pression latérale est constante. Cette différence exprime la charge qui correspond à la vitesse moyenne d'écoulement.

470. *Mesure manométrique de la vitesse dans un tuyau.* — Pour observer à l'aide d'un manomètre la vitesse d'écoulement d'un gaz qui parcourt un tuyau, l'appareil devrait être disposé comme l'indique la figure 42 ; *abc* est un petit tube, dont la partie *bc* est parallèle à l'axe du tuyau, et située à une distance de la surface intérieure égale au tiers du rayon : un autre tube *ee'* est droit, perpendiculaire à l'axe du tuyau, et son extrémité vient affleurer la surface intérieure. Ces deux tubes communiquent par des tubes en caoutchouc avec les deux extrémités d'un manomètre. Il est évident que la hauteur du manomètre donnera la différence des pressions supportées

par les extrémités c et e', et par conséquent, d'après ce qui précède, elle indiquera la charge correspondante à la vitesse de la veine qui rencontre le point c, vitesse sensiblement égale à la vitesse moyenne. La tubulure du tuyau devrait être assez éloignée des points où il y a des changements brusques ou continus de section ou de direction, parce que, dans le voisinage de ces points, il se produit des perturbations dans le régime des veines de gaz. L'échelle du manomètre pourrait porter l'indication des vitesses correspondantes aux excès de pression.

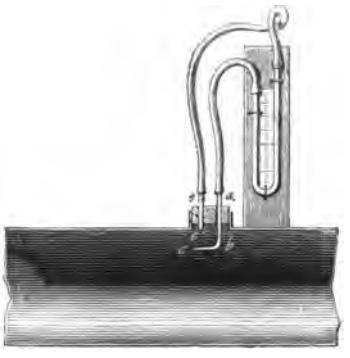


Fig. 42.

Cette méthode serait bien préférable à l'emploi des anémomètres à ailettes, qui ne peuvent servir que dans des tuyaux d'un grand diamètre relativement à la surface décrite par les ailettes, et qui exigent toujours des dispositions particulières embarrassantes : ils ne donnent d'ailleurs la vitesse que pour l'instant des observations, tandis que le manomètre est toujours en fonction, et indique constamment la charge qui produit l'écoulement. Mais quand les vitesses du gaz sont très-petites, le manomètre devrait être d'une grande sensibilité ; car pour des vitesses de l'air à 0°, sous la pression extérieure de $0^m,76$, égales à

$$1^m \quad 2^m \quad 3^m \quad 4^m \quad 5^m \quad 6^m \quad 7^m \quad 8^m \quad 9^m \quad 10^m,$$

Les charges d'eau correspondantes sont en milimètres de

0,066 0,26 0,59 1,059 1,655 2,38 3,24 4,23 5,34 6,62.

Nous reviendrons sur cette question dans un des chapitres suivants.

471. *Pressions latérales.* — Il est facile de trouver la valeur de la pression latérale en un point quelconque d'une conduite. En effet, appelons P l'excès de la pression du gaz dans le réservoir sur la pression atmosphérique, P_1 la pression longitudinale moyenne dans une section quelconque, p_1 la pression latérale dans la même section, et p la charge correspondante à la vitesse moyenne à l'extrémité du tuyau. La perte de charge depuis la section considérée jusqu'à l'extrémité du tuyau sera évidemment $P_1 - p$, et on aura (466)

$P - p = pr$; r représentant la somme des résistances en aval, qui ne dépend, comme nous l'avons vu, que de la forme et des dimensions du tuyau ; mais (470-5°) ; $p_1 = P_1 - p$, donc $p_1 = pr$.

Si l'on voulait avoir p_1 en fonction de P, il suffirait de remarquer que $P - p = pR$, R étant la somme des résistances pour tout le tuyau (466) ; il en résulte $p_1 = P \frac{r}{1+R}$.

472. Dans ce qui précède, le tuyau était supposé horizontal, et la pression atmosphérique était la même autour du tuyau et à son extrémité ; par conséquent la pression latérale indiquée par le calcul serait mesurée par un manomètre dont une branche communiquerait avec un tube débouchant perpendiculairement à la surface du tuyau et à fleur de cette surface, l'autre branche communiquant avec l'air. Mais il n'en serait plus ainsi si le tuyau n'était pas horizontal ; la pression calculée représentant l'excès de la pression intérieure sur la pression de l'atmosphère au bout du tuyau, si le tuyau s'élevait, il faudrait évidemment, pour obtenir l'excès de la pression intérieure sur la pression de l'atmosphère à la même hauteur, retrancher du résultat du calcul la hauteur d'une colonne d'air égale à la distance verticale du point considérée au sommet du tuyau, hauteur qui devrait être transformée préalablement en une hauteur de gaz équivalente ; si le tuyau descendait, la colonne d'air devrait être ajoutée. Il résulte de là un fait important : lorsque de l'air comprimé s'écoule par un tuyau vertical, sous une faible charge, la pression latérale indiquée par un manomètre peut être positive ou négative. Ainsi considérons un tuyau vertical de hauteur H, et cherchons la pression latérale à une hauteur h. Si l'écoulement de l'air se fait par la partie inférieure, la pression latérale indiquée par le manomètre sera $p_1 = pr + h$, r exprimant la résistance du tuyau depuis la hauteur h jusqu'à la partie inférieure. Si, au contraire, l'écoulement se fait par la partie supérieure, on aura $p_1 = pr_1 - (H - h)$, r_1 exprimant la résistance du tuyau depuis la hauteur h jusqu'à la partie supérieure. On voit par cette dernière formule que si $H - h$ est plus grand que pr_1 la pression latérale sera négative.

473. Il est important de remarquer que ces formules ne peuvent s'appliquer que pour les parties de la conduite suffisamment éloignées des points où il y a des changements brusques ou continus de section ou de direction.

474. *Influence de la différence de hauteur des deux extrémités de la conduite.* — Lorsque les extrémités d'une conduite de gaz ne sont

pas au même niveau, la différence de hauteur n'a pas d'influence sur la vitesse d'écoulement, si le gaz a la même densité que l'air extérieur ; mais en général cette égalité n'a pas lieu, même quand c'est de l'air qui s'écoule, à cause des différences de température et de pression. En ce cas, on obtient la charge P, qui produit l'écoulement, de la manière suivante. On calcule la différence des poids de deux colonnes, l'une d'air, l'autre de gaz comprimé, ayant même section et pour hauteur commune la différence des niveaux des deux extrémités de la conduite où s'exerce la pression atmosphérique. On exprime cette différence en colonne de gaz comprimé et on l'ajoute à la pression du réservoir, ou on l'en retranche suivant le cas. En désignant par h la différence de niveau entre le réservoir et l'orifice d'écoulement supposé à un niveau inférieur, par d la densité du gaz comprimé, l'accroissement de charge en question sera $h\,(d-1) : d$, expression qui devient négative quand d est plus petit que l'unité ou que h est lui-même négatif. Cette correction est très-petite et négligeable quand les charges sont considérables ; mais quand elles sont faibles, il est souvent indispensable d'en tenir compte, surtout quand la différence de hauteur des deux extrémités de la conduite est grande. Considérons, par exemple, un tuyau communiquant avec un gazomètre rempli de gaz d'éclairage, dont l'extrémité supérieure par laquelle le gaz se dégage soit à 100 m. au-dessus du gazomètre, la densité moyenne du gaz d'éclairage étant 0,55, l'accroissement de charge sera positif et égal à $100.0{,}45 : 0{,}55 = 81^{m},81$ en air, et à $0^{m},058$ en eau. On conçoit facilement, d'après cela, qu'il est avantageux de placer les usines d'éclairage dans des lieux situés au-dessous de ceux où le gaz doit être conduit, parce que le service peut alors s'effectuer sous une charge plus petite, et qu'il y a moins de perte par les fuites.

475. *Écoulement d'un gaz dans un canal qui, sur une certaine longueur, se divise en plusieurs tuyaux parcourus simultanément par le gaz.* — Nous avons supposé dans ce qui précède que le canal parcouru par le gaz était unique ; supposons maintenant que le canal, sur une certaine partie de sa longueur, soit divisé en plusieurs branches parcourues simultanément ; par exemple, que le canal soit interrompu par deux chambres que réunissent un certain nombre de tuyaux.

Supposons d'abord qu'il n'y ait que deux tuyaux, dont l, l' ; d, d' ; s, s' ; représentent les longueurs, les diamètres et les sections ; désignons par S la section du canal d'amont et de celui d'aval, par V

la vitesse dans ces canaux, et par v et v' les vitesses dans les deux tuyaux de jonction des deux chambres. On aura $SV = sv + s'v'$; et comme les tensions de l'air sont les mêmes à l'origine des tuyaux de jonction et à leurs extrémités, on aura

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{\frac{d' + Kl'}{d + Kl} \cdot \frac{d'}{d}} = m; \quad \text{et} \quad SV = sv + s'mv;$$

$$v = \frac{SV}{s + s'm}; \quad \text{et} \quad v' = \frac{SVm}{s + s'm}.$$

Alors les résistances des deux tuyaux sont

$$\frac{Kl}{d} \cdot \frac{S^2}{(s + s'm)^2}; \quad \text{et} \quad \frac{Kl'}{d'} \cdot \frac{S^2m^2}{(s + s'm)^2}.$$

Mais l'air s'écoulant simultanément par les deux tuyaux, et la résistance étant celle qu'éprouve chaque veine élémentaire, la résistance dans le circuit sera la moyenne des résistances dans les deux tuyaux; elle sera par conséquent

$$\frac{1}{2} \frac{KS^2}{(s + s'm)^2} \left(\frac{l}{d} + \frac{m^2l'}{d'}\right).$$

Si les tuyaux avaient la même longueur et le même diamètre, l'expression précédente se réduirait à $KL^2l : 4s^2d$; et dans le cas où la section du canal ne serait pas changée, on aurait $2s = S$, la résistance se réduirait à $Kl : d$.

S'il y avait trois tuyaux, de dimensions inégales, on aurait, comme précédemment, $VS = sv + s'v' + s''v''$, et

$$\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{d + Kl}{d' + Kl'} \cdot \frac{d'}{d}} = m; \quad \frac{v''}{v} = \sqrt{\frac{d + Kl}{d'' + Kl''} \cdot \frac{d''}{d}} = m'$$

$$SV = sv + s'mv + s''m'v;$$

$$v = \frac{SV}{s + s'm + s''m'}; \quad v' = \frac{mSV}{s + s'm + s''m'}; \quad = \frac{m'SV}{s + s'm + s''m'};$$

et la résistance moyenne serait

$$\frac{1}{3} \frac{KS^2}{(s + s'm + s''m')^2} \left(\frac{l}{d} + \frac{l'm^2}{d'} + \frac{l''m'^2}{d''}\right);$$

résistance qui, dans la supposition où les trois tuyaux ont les mêmes dimensions, se réduit à $KS^2l : 9s^2d$, et seulement à $Kl : d$, quand on a $3s = S$. D'après cela, on trouvera facilement la résistance pour un nombre quelconque de tuyaux.

476. Il résulte évidemment de ce que nous venons de dire, que si dans un circuit le courant, sur une certaine longueur, se partageait dans un grand nombre de tubes égaux, la résistance serait égale à celle que l'air éprouverait dans un seul tube, si la somme des sections des tubes était égale à la section du canal en aval et en amont; et si les sections étaient différentes, à $Kl.\ S^2 : d.\ S_1^2$; S_1 étant égal à la somme des sections des tubes. Cette circonstance se rencontre dans les locomotives et dans beaucoup de générateurs de bateaux à vapeur. Comme ce principe est très-important, je crois qu'il est utile de l'expliquer directement par une autre méthode.

La résistance qu'éprouve l'air en parcourant un tuyau cylindrique d'une forme quelconque est représentée (439) par l'expression $KCl : 4S_1$, dans laquelle C représente le contour du tuyau, S_1 la section et l la longueur. Or, si nous désignons par n le nombre des tuyaux, et par d leur diamètre, on aura $C = n\pi d$, $S_1 = n\pi d^2 : 4$, et par suite la résistance sera $Kl : d$; et si la somme des sections S_1 des tubes n'était pas égale à la section S du canal en aval et en amont, la résistance rapportée à la charge d'aval et d'amont deviendrait $Kl.S^2 : dS_1^2$.

477. *Écoulement d'un gaz comprimé dans un canal qui le distribue à des conduites latérales.* — Considérons d'abord un canal d'une section constante S, et soient s, s', s''... les sections des conduites latérales. Négligeons les résistances dans le canal. Nous savons qu'on a en général (466) :

$$Q = S\sqrt{\frac{2gP}{1+R}};$$

Q étant le volume du gaz écoulé dans une seconde, P la charge en gaz, et R la somme des résistances dans le tuyau ; or, on peut considérer le facteur $1 : (1+R)$ comme affectant la charge P, ou la racine carrée de ce facteur, comme affectant la section. Alors, en désignant par m, m', m''..... les valeurs de ces facteurs pour les différents tuyaux, on pourra regarder l'écoulement comme ayant lieu par des orifices en mince paroi, dont les surfaces réduites seraient égales à ms, $m's'$, $m''s''$.... Remarquons maintenant que la vitesse du courant, après le passage devant le premier orifice, diminue dans le rapport de S à $S + ms$; après le second, dans le rapport de S à $S + ms + m's'$, et ainsi de suite ; et qu'il en est de même de l'excès de pression qui se trouve dans le courant, du moins en assimilant le gaz à un liquide de même densité, et en négligeant la résistance que

le gaz éprouve dans le tuyau distributeur. En désignant par P la charge du réservoir, par $p, p', p'', \ldots$ les charges à l'entrée des orifices qui remplacent les tuyaux, nous aurons :

$$p = P; \qquad p' = \frac{PS}{S + ms}; \qquad p'' = \frac{PS}{S + ms + m's'}; \ldots \quad (a)$$

charges qui sont toutes relatives aux sections en mince paroi réduites, $ms, m's' \ldots$ etc.

478. Quand la section du canal n'est pas très-grande relativement à la somme des sections des tuyaux, ou que le canal est très-long, on ne peut pas négliger les résistances que le gaz y éprouve; mais, dans ce cas, il est encore facile de déterminer les valeurs de $p, p', p'' \ldots$ Désignons par $r, r', r'', \ldots$ les résistances que le gaz éprouve jusqu'au premier orifice, du premier au second, du second au troisième, etc.; on aura évidemment

$$p = \frac{P}{1 + r}; \qquad p' = \frac{PS}{(1 + r)(1 + r')(S + ms)};$$

$$p'' = \frac{PS}{(1 + r)(1 + r')(1 + r'')(S + ms + m's')}.$$

Tout ce que nous venons de dire suppose nécessairement que les pressions extérieures sur les divers orifices sont les mêmes, et par conséquent que le canal est sensiblement horizontal.

479. *Écoulement d'un gaz dans un canal sous l'influence d'un appel fait à l'une des extrémités.* — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que le gaz pénétrait dans le canal, en vertu d'une compression. Si l'écoulement est produit par une dilatation effectuée à l'une des extrémités de la conduite, et que les variations de pressions soient assez petites pour ne pas changer sensiblement la densité du gaz, tout se passera évidemment comme si la détente, à l'un des bouts du canal, était remplacée par un excès de pression égal à l'autre extrémité.

480. Il est important de remarquer que, lorsqu'un gaz parcourt un même tuyau successivement dans les deux sens opposés et sous la même charge, les résistances peuvent être fort différentes. Les résistances provenant du frottement et des changements de direction ne varient pas, mais il n'en est pas de même pour les changements de section, car les variations de charge sont très-différentes pour un décroissement ou pour un accroissement de section.

481. Dans le cas d'un mouvement par appel, les pressions laté-

rales deviendraient des dépressions ; mais les différences de niveau du manomètre seraient les mêmes que dans le mouvement par compression. Ainsi, dans le cas d'un tuyau rectiligne horizontal, complétement ouvert à son extrémité, ces dépressions iraient en décroissant de l'extrémité d'appel à l'extrémité libre où elles seraient nulles. Dans tous les cas, elles pourraient se calculer comme nous l'avons indiqué (473), et on pourrait compter sur une approximation bien suffisante dans les applications, du moins pour des points assez éloignés de ceux où il y a des changements brusques ou continus de section ou de direction.

CHAPITRE IX

Passage de l'air à travers les murs sous de faibles pressions.

482. La détermination du volume d'air qui peut traverser les murs, sous une pression déterminée, est un problème qui se présente souvent dans les études relatives aux travaux de l'ingénieur : M. Hudelo a publié dans le *Bulletin de l'Association des anciens élèves de l'École Centrale* les résultats d'une série d'expériences faites sur le genre de maçonnerie en briques qui est employé dans la construction des fourneaux et des cheminées d'usine.

L'appareil, dont M. Hudelo s'est servi, est une caisse rectangulaire en tôle ouverte à la partie antérieure. La partie supérieure est mobile et peut être boulonnée sur les bords de la caisse; on l'enlève pour construire les murs sur lesquels on veut expérimenter; c'est le vide formé par la partie antérieure, qui reçoit ces murs d'épaisseurs et de matériaux divers ; l'ouverture, et par suite le mur qui vient la remplir, a $1^{m},02$ de hauteur et $0^{m},62$ de largeur ; ce qui fournit une superficie de $0^{mq},630$.

La partie postérieure de la caisse est mise en communication, au moyen d'un tube en tôle de $0^{m},20$ de diamètre, avec un gazomètre à air, plongeant dans une cuve à eau. Ce gazomètre est soutenu au moyen d'une corde qui passe sur deux poulies et qui porte à sa seconde extrémité un plateau de balance. En chargeant le gazomètre, ou le plateau, de poids variables, on peut à volonté changer la pression de l'air dans la caisse.

La détermination de la charge, sous laquelle se faisait l'écoule-

ment, était obtenue au moyen d'un manomètre différentiel à eau, de Péclet, donnant facilement le dixième de millimètre.

Un compteur à seconde et à pointage de Bréguet servait à déterminer la durée des expériences. Comme les différences de pression à l'intérieur et à l'extérieur de l'appareil étaient faibles, la poussée qui se produit pendant la descente du gazomètre, par suite de l'immersion de son enveloppe cylindrique, suffit pour amener une variation de pression relativement considérable. Il fallait augmenter le poids du gazomètre, ou, ce qui revient au même, diminuer le poids du plateau pendant la descente de la cloche, et réciproquement. Pour y arriver, on fixa au plateau un tube vertical en verre de diamètre convenablement choisi ; la partie inférieure de ce tube était en communication, au moyen d'un tuyau de caoutchouc, avec un vase cylindrique placé à une hauteur déterminée et présentant une surface très-large par rapport à la section du tube ; tout l'appareil était plein de mercure. Quand la cloche baissait, le plateau montait et le mercure, conservant un niveau sensiblement constant dans le vase, s'abaissait relativement dans le tube qui s'élevait avec le plateau ; il en résultait une diminution de la charge de ce plateau ; à la montée du gazomètre, l'effet inverse se produisait.

Pour mesurer la quantité d'air écoulée, on observait la marche d'un index fixé à la cloche du gazomètre, sur une échelle verticale placée latéralement et divisée en millimètres. Le rayon intérieur du gazomètre étant de $0^{m},30$, sa section était de $0^{mq},282744$ et par suite le volume correspondant à 1 centimètre de hauteur était de $2^{lit},8274$.

On n'a pas cherché à déterminer les changements qu'introduiraient les variations de température dans les résultats observés ; les expériences ont été faites dans un sous-sol de l'École Centrale, où la température s'est toujours maintenue entre 12° et 14°.

On n'a point tenu compte non plus de la pression atmosphérique, dont les variations n'ont pas paru influer sur les conditions de l'expérience.

Quelque soin qu'on ait pris pour régulariser la pression, il a été impossible d'arriver à une constance absolue pendant toute la durée de l'expérience. Afin de tenir compte des variations, on prenait la moyenne des pressions observées de demi-minute en demi-minute. Ce procédé est très-suffisamment exact ; car, comme on le verra plus loin, les quantités d'air qui passent sont sensiblement proportionnelles aux différences de pression ; et, d'ail-

leurs, les variations étaient faibles pendant la durée d'une même expérience.

483. La première série d'observations a été exécutée sur un mur de briques de $0^m,22$ d'épaisseur, hourdé en terre à four.

On a trouvé que pour des pressions comprises entre $0^m,0025$ et $0^m,0425$ d'eau, il n'y a pas de différence appréciable entre les résultats fournis dans le cas de l'appel ou dans celui du refoulement de l'air, et la formule.

$$Q = 0{,}063P + 0{,}1\sqrt{P}$$

représente d'une façon très-satisfaisante tous les résultats observés ; dans cette formule P est la différence des pressions aux deux faces du mur exprimée en millimètres d'eau, Q est, en mètres cubes, la quantité d'air qui passe à travers le mur par mètre carré et par heure.

Influence du vent. — En dirigeant sur le mur, au moyen d'un ventilateur, un courant d'air dont la vitesse était de 12 à 15 mètres par seconde, on a pu constater que l'influence du vent, au moins sur un mur convenablement construit et sans fissures, est très-sensiblement nulle.

Influence de l'eau. — En arrosant la surface du mur, de façon à la mouiller extérieurement dans toute son étendue, on constate que la quantité d'air qui traverse le mur est sensiblement réduite aux quatre dixièmes de celle qui traverse le mur sec.

Influence des enduits. — Le même mur a été recouvert extérieurement d'un enduit de plâtre de $0^m,01$ d'épaisseur ; on a constaté que la quantité d'air qui traverse est sensiblement le tiers de ce qu'elle est pour le mur nu, et que cette quantité reste à peu près la même, quel que soit l'état de dessiccation de l'enduit, ou bien encore que la surface de cet enduit soit mouillée ou non.

484. On a opéré ensuite sur un mur de $0^m,46$ d'épaisseur en briques hourdé et rejointoyé en terre à four ; sur ce mur on a étudié l'influence de l'état de dessiccation de la maçonnerie ; on a trouvé que le mur sec laisse passer un volume d'air qui dépasse de 22 pour 100 environ celui qui traverse le mur à l'état frais, mais qu'après une dessiccation de 10 à 15 jours, la quantité d'air qui traverse le mur n'est plus inférieure que de 4 à 5 pour 100 à celle qui le traverse à l'état de dessiccation complète.

La formule :

$$Q = 0{,}043P + 0{,}057\sqrt{P}$$

donne la quantité d'air, en mètres cubes, qui traverse le mur sec par mètre carré et par heure ; on voit que la quantité d'air qui traverse les murs construits de la même façon ne varie pas tout à fait en raison inverse de leur épaisseur, car, l'épaisseur devenant double, la quantité d'air qui traverse devient à peu près les six dixièmes de ce qu'elle était d'abord.

Influence de l'eau. — Le mur mouillé ne laisse passer que 4 à 5 dixièmes de la quantité d'air que laisse passer le mur sec ; la réduction est un peu plus faible pour ce mur que pour celui de $0^m,22$ d'épaisseur ; dans les deux cas, elle paraît augmenter légèrement quand la pression s'élève.

Influence des enduits. — L'effet d'un enduit de plâtre de $0^m,01$ d'épaisseur est de réduire la quantité d'air qui passe à travers le mur aux quatre dixièmes environ de ce qui passait avant la pose de l'enduit ; la réduction proportionnelle est un peu moindre pour le mur de $0^m,46$ d'épaisseur que pour celui de $0^m,22$; elle est d'ailleurs à peu près égale à celle que produit le mouillage.

485. *Influence de la nature du mur.* — Pour se rendre compte de cette influence, M. Hudelo a opéré sur un mur en briques de $0^m,11$ d'épaisseur, maçonné et rejointoyé en plâtre.

La quantité d'air qui traverse ce mur est donnée par la formule :

$$Q = 0{,}054P + 0{,}036\sqrt{P};$$

les valeurs trouvées pour ce mur sont intermédiaires entre celles qui ont été obtenues pour les murs maçonnés en terre à four de $0^m,22$ et de $0^m,46$ d'épaisseur ; c'est-à-dire qu'un mur maçonné en plâtre présente à peu près trois fois plus de résistance au passage de l'air qu'un mur maçonné avec de la terre à four.

Influence des enduits. — Le mur ayant été recouvert d'un enduit de plâtre extérieurement, la quantité d'air qui passe est comprise entre les cinq et les six dixièmes de ce qu'elle était d'abord ; lorsque le mur est recouvert d'un enduit de plâtre de chaque côté, cette quantité est réduite aux trois dixièmes seulement.

486. Des expériences ont enfin été faites sur un mur en plaquettes de meulière de $0^m,18$ d'épaisseur, hourdé en ciment et parfaitement enduit de ciment des deux côtés, les résultats ont mené à la formule :

$$Q = 0{,}00095P + 0{,}00092\sqrt{P}.$$

Il résulte de ces expériences que la quantité d'air qui traverse un mur hourdé en ciment n'est pas nulle. Quoiqu'elle soit faible, elle n'est pas négligeable; et cela explique comment les enveloppes en ciment ne peuvent pas suffire dans le cas où on a besoin d'une imperméabilité absolue, comme il le faut pour les silos destinés à la conservation des grains.

On doit observer que les murs expérimentés étaient construits en matériaux ordinaires, mais sans défectuosités apparentes; que de plus ces murs, bien rejointoyés, ne présentaient ni lézardes ni fissures d'aucun genre. En conséquence, les nombres des formules qui précèdent sont, quant aux quantités d'air qui s'écoulent à travers les murs, des *minima* qui peuvent être notablement dépassés dans la réalité, par exemple dans des fourneaux de chaudières à vapeur à foyer extérieur.

487. On doit à M. Viard quelques expériences relatives aux quantités d'air qui traversent les parois des tuyaux en ciment (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXIX). M. Viard opérait en bouchant un tuyau à la partie supérieure et soudant à la partie inférieure une allonge en verre, dont la partie évasée était à l'intérieur du tuyau, et dont le col était extérieur; un petit tube en verre était introduit dans le côté du tuyau, sa partie extérieure était fixée sur un tube de Mariotte plein d'eau, et sa partie intérieure versait l'eau dans l'allonge; quand l'allonge était bouchée et qu'une première période d'écoulement rapide avait comprimé le gaz renfermé, la quantité d'eau écoulée mesurait la quantité de gaz que le tuyau perdait dans le même temps. La pression était déterminée par un manomètre à eau.

En employant des pressions qui ont varié depuis $1^m,7$ jusqu'à $2^m,22$, M. Viard a trouvé :

1° Que la vitesse d'écoulement est proportionnelle à la simple pression ;

2° Que le rapport des vitesses de l'écoulement du gaz d'éclairage et de celui de l'air est compris entre 1,58 et 1,54 ;

3° Que la perméabilité d'un tuyau augmente à mesure qu'on s'éloigne du moment de sa fabrication, quand le tuyau est en lieu sec, mais que les tuyaux enterrés et formant des conduites établies étaient d'autant moins perméables qu'ils étaient plus vieux ; ce fait s'explique suffisamment par l'humidité que perdent les tuyaux dans le premier cas et qu'ils gagnent dans le second ;

4° Que les tuyaux faits de ciment gâché ferme sont moins perméa-

bles que ceux faits de ciment gâché clair ; la différence se prononce surtout quand les tuyaux se dessèchent, et pour les cas extrêmes, le rapport des perméabilités a pu s'élever à 20 ;

5° Que les soudures des tuyaux n'augmentent pas d'une façon sensible la perméabilité ;

6° Que la perte par mètre carré et par heure à travers la paroi de tuyaux ayant servi deux ans à la conduite du gaz n'a été que de $0^{m3},0005$ à $0^{m3},0003$, pour une pression d'eau de $0^{m},7$.

On remarquera que ces nombres sont notablement inférieurs à ceux qu'a obtenus M. Hudelo pour un mur hourdé en ciment et enduit de ciment des deux côtés : cette différence dans les résultats peut évidemment s'expliquer par ce fait que le tuyau constamment traversé de gaz d'éclairage s'était enduit de goudron qui avait dû en obstruer les pores.

CHAPITRE X

Écoulement de la vapeur sous différentes pressions.

488. Les plus anciennes expériences sur l'écoulement de la vapeur datent de 1823 ; elles sont dues à M. Christian, qui les a rapportées dans son *Traité de mécanique industrielle*, t. II, p. 288.

L'appareil dont M. Christian s'est servi se composait d'une petite chaudière en fonte, cylindrique, placée verticalement dans un fourneau ; l'orifice était fermé par une plaque de fonte serrée par des vis ; un flotteur formé d'un cylindre de cuivre plein, suspendu à un fil de cuivre très-fin qui sortait du couvercle de la chaudière à travers une boîte à étoupe, servait à indiquer le niveau de l'eau dans la chaudière : pour éviter les oscillations du flotteur, il était environné d'un cylindre fixe, en toile métallique ; le niveau de l'eau était rendu constant au moyen d'une pompe foulante. Cette petite chaudière renfermait ordinairement 10 litres d'eau. L'écoulement de la vapeur avait lieu par un orifice circulaire de 9 millimètres carrés de surface, percé dans une plaque dont l'épaisseur n'a point été indiquée. M. Christian a donné les résultats de ses expériences sans faire aucun calcul. Voici les circonstances de ces expériences et les valeurs du coefficient de contraction, en admettant que la vapeur se comporte exactement comme un liquide de même densité. La hauteur du baromètre était de $0^{m},762$. Aux températures de

105°	110°	115°	120°	125°	130°

qui correspondent aux pressions en mercure

$0^m,898$ $1^m,061$ $1^m,245$ $1^m,454$ $1^m,686$ $1^m,966$

et aux excès de pression en mercure

$0^m,136$ $0^m,299$ $0^m,483$ $0^m,692$ $0^m,924$ $1^m,204$

1^k de vapeur s'est écoulé en :

$780''$ $515''$ $355''$ $320''$ $270''$ $195''$.

A ces différentes températures, la densité de la vapeur est égale à

0,0006876 0,0008012 0.0009261 0,00107 0,001224 0,00141.

Les volumes d'un kilogramme de vapeur sont

$1^{mc},454$ $1^{mc},248$ $1^{mc},080$ $0^{mc},954$ $0^{mc},819$ $0^{mc},709$.

Les volumes écoulés par seconde sont alors

$0^{mc},00186$ $0^{mc},002427$ $0^{mc},093042$ $0^{mc},002919$ $0^{mc},00303$ $0^{mc},00363$;

et par suite les vitesses réelles d'écoulement sont

$206^m,66$ $269^m,66$ $338^m,00$ $324^m,30$ $336^m,66$ $403^m,33$.

Les excès de pression estimés en vapeur étant

2135^m 5071^m 7088^m 8789^m 10272^m 10612^m,

les vitesses théoriques déduites de la formule $v = \sqrt{2gh}$ sont :

$204^m,6$ $315^m,5$ $372^m,9$ $415^m,4$ $448^m,9$ 477,3;

ce qui donne pour les coefficients de correction

1,0 0,85 0,90 0,79 0,75 0,84.

489. Ces résultats sont fort irréguliers, très-probablement à cause de la quantité d'eau entraînée mécaniquement; car cette quantité, qui pouvait être très-différente dans les diverses expériences, est considérée dans le calcul comme étant à l'état de vapeur, et conduit à une valeur trop grande pour le volume dégagé, et, par suite, à une valeur trop forte pour la vitesse et pour le coefficient de contraction. D'ailleurs, si les coefficients de correction avaient eu des valeurs décroissantes, comme pour les gaz permanents, on n'aurait

rien pu en conclure de positif sur leurs valeurs absolues, attendu que l'épaisseur de la plaque, dans laquelle l'orifice était percé, n'a pas été indiquée. Mais, malgré les irrégularités de ces expériences, on ne peut pas douter que les vapeurs ne suivent dans leur écoulement les lois des fluides incompressibles.

490. Les expériences qui ont été faites par une commission d'ingénieurs des mines, pour établir la formule empirique qui servait anciennement à déterminer les diamètres des soupapes de sûreté, constatent d'une manière très-nette que les vapeurs dans leur écoulement par des orifices se comportent exactement comme des fluides incompressibles. La formule qui résulte de ces expériences est :

$$D = 1{,}3\sqrt{\frac{S}{n-0{,}412}}; \quad \text{ou} \quad S' = 1{,}32\,\frac{S}{n-0{,}412} \quad \ldots\ (1)$$

D étant le diamètre de l'orifice en centimètres, S' sa surface en centimètres carrés, S la surface de chauffe de la chaudière en mètres carrés, et n le nombre d'atmosphères de la vapeur. Les expériences ont été faites sur une chaudière d'une petite surface, exposée à un foyer d'une très-grande étendue, de manière à obtenir le maximum de vaporisation ; et on mesurait la pression de la vapeur correspondante à différentes surfaces de l'orifice de dégagement.

491. Calculons la valeur de S' en admettant que la vapeur s'écoule comme un liquide de même densité, et que le poids maximum de vapeur, qu'on puisse produire par mètre carré de surface de la chaudière et par heure, soit de 100 kilogr., du moins quand l'air d'alimentation du foyer est appelé par une cheminée : c'est le chiffre qui résulte des expériences de Christian. En désignant par d la densité de la vapeur, le volume de vapeur produit par seconde sera

$$\frac{100\,S}{3600\,.\,d} = \frac{0^{dc},028S}{d}, \quad \text{ou bien} \quad \frac{0^{mc},000028S}{d},$$

mais la vitesse d'écoulement de la vapeur, en la supposant la même que celle d'un liquide de même densité, est

$$v = \varphi\sqrt{\frac{2g\,.\,10{,}33(n-1)}{d}} = 14{,}33\,.\,\varphi\sqrt{\frac{n-1}{d}};$$

ainsi on aura

$$\frac{0{,}000028\,.\,S}{d} = \varphi S'\,.\,14{,}33\sqrt{\frac{n-1}{d}};$$

d'où

$$\varphi S' = 0{,}0000020\,\frac{S}{d}\sqrt{\frac{d}{n-1}} = 0{,}0000020\,S\sqrt{\frac{1}{d(n-1)}};$$

ou

$$\varphi S' = 0{,}02\,.\,S\sqrt{\frac{1}{d(n-1)}}$$

S' étant estimé en centimètres carrés ; et comme

$$d = \frac{0{,}0013\,.\,5\,.\,n}{8(1+at)} = \frac{0{,}00081n}{1+at}.$$

il vient

$$\varphi S' = 0{,}020\,S\sqrt{\frac{1+at}{0{,}00081n(n-1)}} = 0{,}7\,.\,S\sqrt{\frac{1+at}{n(n-1)}};$$

$$S' = S\sqrt{\frac{1+at}{n(n-1)}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

en supposant $\varphi = 0{,}7$.

492. Les formules (1) et (2) ne se ressemblent pas ; mais si l'on fait dans toutes les deux $S = 1$, et si on prend successivement pour n les nombres 2, 4, 6, 8, 10, et pour t les nombres 121°, 154°, 160°, 172°, 181°, qui correspondent aux valeurs de n, la formule (1) donne pour S'

0,831	0,367	0,236	0,174	0,137

et la formule (2)

0,846	0,360	0,230	0,170	0,136 ;

ces nombres sont certainement aussi rapprochés qu'on pouvait l'espérer.

Mais cette identité des résultats obtenus par les deux formules, dans les limites de pression des expériences, suppose nécessairement que la valeur de φ est constante et égale à 0,70 ; or, d'après les expériences de MM. Wantzel et Saint-Venant, la valeur de φ pour l'air décroît avec la pression ; en outre, même en supposant que l'écoulement ait eu lieu par un ajutage cylindrique, cette valeur de φ, dans les limites de pression des expériences, est toujours inférieure à 0,70, car (384) elle décroît constamment depuis $\varphi = 0{,}67$ pour $n = 2$ jusqu'à $\varphi = 0{,}51$ pour $n = 10$. On ne peut concilier les résultats que nous venons d'obtenir avec les expériences de MM. Want-

zel et Saint-Venant, qu'en admettant que dans les expériences de la commission des ingénieurs des mines, comme dans tous les cas de vaporisation, sans exception, il y a eu de l'eau entraînée mécaniquement, et en quantité croissante avec la température, de manière à compenser le décroissement du coefficient de contraction.

493. En considérant les expériences de d'Aubuisson, celles de M. Poncelet, celles de MM. Wantzel et Saint-Venant et de M. Weisbach, celles que j'ai faites, et enfin les expériences sur l'écoulement de la vapeur, il me paraît parfaitement démontré que les gaz et les vapeurs s'écoulent par des orifices en mince paroi, comme des fluides incompressibles de même densité ; mais pour les gaz permanents, on a un coefficient de correction qui varie de 0,65 à 0,42, pour des excès de charge variant de 0,01 d'atmosphère à l'infini ; et, pour les vapeurs, un coefficient de correction à peu près constant, probablement de 0,54 pour des orifices en mince paroi, et de 0,70 pour des ajutages cylindriques.

On tiendrait compte de la quantité d'eau entraînée par la vapeur, en augmentant convenablement la valeur de sa densité.

494. La théorie mécanique de la chaleur a fourni, pour l'écoulement de la vapeur, une formule toute différente de celle de l'écoulement des gaz.

Considérons comme dans le cas des gaz un canal à section variable traversé par un mélange de vapeur et d'eau condensée.

Représentons par m le poids d'eau et par M le poids de vapeur qui traverse une couche infiniment mince dans l'unité de temps. Soient encore :

u la vitesse du fluide,

p la pression, t la température } de la vapeur saturée,

v le volume de l'unité de poids de la vapeur à la température t et à la pression p,

r la chaleur latente de vaporisation de la vapeur qui, d'après Clausius, est

$$r = 607{,}31 - 0{,}7106t,$$

et $$\rho = 575{,}03 - 0{,}7882t,$$

ρ étant la chaleur latente interne de la vapeur ; c'est-à-dire la chaleur qui suffit à la transformation de 1 kilogr. d'eau en vapeur sans y comprendre la chaleur qui est nécessaire au travail d'expansion de la vapeur. $C = 1{,}0224$, est la capacité calorifique de l'eau à l'état liquide.

L'accroissement de force vive extérieure du fluide sera

$$\frac{(m+\mathrm{M})}{g}\,udu.$$

L'accroissement de force vive intérieure de l'eau sera

$$\frac{m\mathrm{C}dt}{\mathrm{A}}.$$

L'accroissement de force vive intérieure de la vapeur se composera de deux parties : la première, résultant de l'élévation de température de l'eau génératrice de la vapeur; la seconde de l'accroissement de la chaleur interne de vaporisation ; soit

$$\frac{\mathrm{MC}dt}{\mathrm{A}}+\frac{d(\mathrm{M}\rho)}{\mathrm{A}}.$$

Quant au travail des pressions extérieures, il est égal, comme nous l'avons vu dans le cas des gaz, à $-d(\mathrm{S}pu)$
et comme

$$\mathrm{S}u=\mathrm{M}v, \quad \text{on a} \quad -d(\mathrm{S}pu)=-d(\mathrm{M}pv)$$

Si nous supposons qu'il n'y ait ni gain ni perte de chaleur externe, l'équation de la force vive sera, en négligeant le travail de la pesanteur :

$$(m+\mathrm{M})\frac{udu}{g}+\frac{m\mathrm{C}dt}{\mathrm{A}}+\frac{\mathrm{MC}dt}{\mathrm{A}}+\frac{d(\mathrm{M}\rho)}{\mathrm{A}}=-d(\mathrm{M}pv),$$

mais d'après M. Zeuner on a

$$\rho=r-\mathrm{A}pv,$$

d'où

$$d(\mathrm{M}\rho)=d(\mathrm{M}r)-\mathrm{A}d(\mathrm{M}p\overset{\cdot}{v});$$

remplaçant dans l'équation précédente, il vient

$$(m+\mathrm{M})\left(\frac{udu}{g}+\frac{\mathrm{C}dt}{\mathrm{A}}\right)+\frac{d(\mathrm{M}r)}{\mathrm{A}}=0,$$

et en intégrant entre les limites E_0 et t et remarquant que la vitesse u_0 est nulle, on aura

$$(m+\mathrm{M})\left[\frac{u^2}{2g}+\frac{\mathrm{C}(t-t_0)}{\mathrm{A}}\right]+\frac{\mathrm{M}r-\mathrm{M}_0r_0}{\mathrm{A}}=0,$$

d'où enfin :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{C(t_0 - t)}{A} + \frac{M_0}{m + M}\frac{r_0}{A} - \frac{M}{m + M}\cdot\frac{r}{A},$$

et si nous posons

$$q_0 = \frac{M_0}{m + M}, \qquad q = \frac{M}{m + M};$$

q_0 et q représentant la fraction de vapeur sèche existant dans la masse totale du fluide, on aura :

$$A\frac{u^2}{2g} = C(t_0 - t) + q_0 r_0 - qr;$$

or, dans le cas où il n'y a ni perte ni gain de chaleur extérieure, on a la relation connue :

$$C\frac{dt}{273 + t} + d\frac{mr}{273 + t} = 0,$$

qui, étant intégrée, fournit :

$$\frac{q_0 r_0}{273 + t_0} - \frac{qr}{273 + t} = C\log\text{nép}\frac{273 + t}{273 + t_0} = 2{,}3026\ .\ C\log\frac{273 + t}{273 + t_0};$$

on tire de là

$$qr = (273 + t)\left[\frac{q_0 r_0}{273 + t_0} + 2{,}3026\ .\ C\log\frac{273 + t_1}{273 + t_0}\right],$$

d'où, en remplaçant dans l'équation que donne la vitesse, on a :

$$A\frac{u^2}{2g} = \left[C + \frac{q_0 r_0}{273 + t_0}\right](t_0 - t) - C(273 + t)\ .\ 2{,}3026\log\frac{273 + t_0}{273 + t},$$

expression dans laquelle q_0, r_0, t_0 s'appliquent à la vapeur du récipient, et où t désigne la température de la vapeur saturée dont la pression est égale à la pression extérieure.

495. Si la vapeur du récipient était sèche et saturée, il faudrait faire dans cette formule $q_0 = 1$.

La quantité de vapeur qui se condense pendant l'écoulement se trouve facilement ; on a :

$$q_0 - q = q_0\left[1 - \frac{273 + t}{r}\cdot\frac{r_0}{273 + t_0}\right] - \frac{273 + t}{r}C\log\text{nép}\frac{273 + t_0}{273 + t}.$$

496. Si la vapeur qui s'écoule est surchauffée, elle commence, dans

sa détente, à se conduire comme un gaz; il pourra alors se présenter deux cas différents, suivant que la détente amènera ou n'amènera pas une condensation de vapeur; voici comment on reconnaîtra auquel de ces deux cas on aura affaire : soit K le rapport des capacités calorifiques de la vapeur à pression constante et à volume constant, soient p_0 et t_0 la pression et la température de la vapeur surchauffée, soit p la pression extérieure; si la vapeur se conduit comme un gaz, la formule de Poisson est applicable et on a :

$$\frac{273+t}{273+t_0}=\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}};$$

on tirera t de cette formule; si t est supérieur ou égal à la température de la vapeur saturée, sous la pression p, il n'y aura pas de condensation de vapeur et on devra se servir de la formule de l'écoulement des gaz dans laquelle on fera $C=0{,}475$ et $K=1{,}2771$ (Masson). Si, au contraire, t est inférieur à la température de la vapeur saturée sous la pression p, il faudra modifier la formule.

On déterminera d'abord la température t_1 et la pression p, pour laquelle la vapeur, en se détendant, deviendra saturée; pour cela on se servira de la relation de Poisson

$$\frac{273+t_1}{273+t_0}=\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

et de la formule qui lie la pression et la température de la vapeur saturée qui est $\log p = a + b\alpha^t. + c\beta^t.$ M. Régnault a calculé les constantes de cette formule. La valeur de $\log p_1$ se tirera de la première équation, on la remplacera dans la seconde et on aura une équation transcendante en t, qui pourra fournir la valeur cherchée, mais il vaudra mieux employer le procédé graphique; on construira sur une même feuille, et par rapport aux mêmes axes, la courbe qui représente la formule de Poisson et celle qui représente la variation des pressions de la vapeur saturée, le point d'intersection des deux courbes donnera à la fois t_1 et p.

Ces valeurs étant obtenues, on les introduira dans la formule suivante qui donne la vitesse :

$$A\frac{u^2}{2g}=C_1(t_0-t_1)+C(t_1-t)+(r_1-qr);$$

elle peut être transformée par des considérations identiques à celles

qui nous ont servi à transformer les autres formules, et qui donnent alors :

$$A\frac{u^2}{2g}=C_1\left[1-\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right](273+t_0)+\left[C+\frac{r_1}{273+t_1}\right](t_1-t)$$
$$-C(273+t)\,.\,2{,}3036\log\frac{273+t_1}{273+t},$$

formule dans laquelle :

$$C_1=0{,}475 \qquad \text{et} \qquad C=1{,}0234.$$

497. En Allemagne, on emploie une formule modifiée par M. Grashof : (Zeitschrift des deutschen Ingenieurvereins, année 1860).

On peut mettre la quantité de vapeur condensée sous la forme :

$$q_0-q=\frac{1}{2}\frac{\frac{r}{273+t}-\frac{r_0}{273+t_0}}{\frac{r}{273+t}}\,.\,2q_0-\frac{C\log\text{nép}\,\frac{273+t_0}{273+t}}{\frac{r}{273+t}};$$

Mais pour les valeurs ordinaires de t et de t_0, on peut prendre

$$\text{Log nép}\,(273+t)=5{,}665+0{,}00255t,$$

d'où :

$$C\log\text{nép}\,\frac{273+t_0}{273+t}=1{,}0224\times 0{,}00255(t_0-t)$$

or, on a

$$r=607{,}31-0{,}7106t=801{,}31-0{,}7106(273+t),$$

d'où

$$t_0-t_1=\frac{(273+t)(273+t_0)}{801{,}31}\left[\frac{r}{273+t}-\frac{r_0}{273+t_0}\right],$$

d'où

$$\frac{C\log\text{nép}\,\frac{273+t_0}{273+t}}{\frac{r}{273+t}}=\frac{1{,}0224\times 0{,}00255(273+t)\,(273+t_0)\frac{r}{273+t}-\frac{r_0}{273+t_0}}{801{,}31\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\frac{r}{273+t}};$$

pour les valeurs numériques de t et de t_0 comprises entre 100 et 150°, la valeur du coefficient du second membre est très-sensiblement égale à $\frac{1}{2}$, et on a :

$$q_0-q=\frac{1}{2}\frac{\frac{r}{273+t}-\frac{r_0}{273+t_0}}{\frac{r}{273+t}}(2q_0-1).$$

M. Grashof a posé :

$$\frac{1}{2}\frac{\frac{r}{273+t}-\frac{r_0}{273+t_0}}{\frac{r}{273+t}}=(1+\alpha)\frac{\rho-\rho_0}{\rho},$$

il a de plus calculé les valeurs de α pour les cas les plus ordinaires ; ces valeurs sont inscrites au tableau suivant :

PRESSIONS FINALES.	PRESSIONS INITIALES p_0 EN ATMOSPHÈRES.				
	6	5	4	3	2
$\frac{1}{2}$ ..... $\alpha =$	»	»	»	0,160	0,199
1 ..... $\alpha =$	»	0,107	0,128	0,156	0,194
$1\frac{1}{2}$ ..... $\alpha =$	0,086	0,103	0,124	0,151	»
2 ..... $\alpha =$	0,085	0,102	0,123	»	»
3 ..... $\alpha =$	0,081	»	»	»	»

Il vient alors :

$$q_0 = q = (1+\alpha)\frac{\rho-\rho_0}{\rho}(2q_0-1).$$

Si on reprend la formule :

$$\frac{Au^2}{2g} = C(t_0 - t) + q_0 r_0 - qr$$

en remarquant que $r = \rho - A\,pv$, v étant le volume spécifique de la vapeur, il vient :

$$A\frac{u^2}{2g} = C(t-t_0) + q_0\rho_0 - q\rho + A(p_0v_0q_0 - pvq);$$

or

$$q_0\rho_0 - q\rho = (q_0 - q)\rho - q_0(\rho - \rho_0),$$

et en remplaçant $q_0 - q$ par sa valeur, on a :

$$\frac{Au^2}{2g} = \left[C + \left\{(1+2\alpha)q_0 - (1+\alpha)\right\}0{,}7882\right](t_0 - t) + A(p_0v_0q_0 - pvq),$$

formule qui ne paraît pas notablement plus simple que celle qui a

été obtenue directement, d'autant plus qu'elle comporte l'emploi du coefficient α qui n'est pas donné dans tous les cas et dont le calcul est assez long d'ailleurs.

498. Dans le cas où la pression finale p diffère peu de la pression atmosphérique, M. Zeuner a calculé une formule simple qui donne, pour la vapeur saturée et sèche une valeur très-approchée de u; cette formule est la suivante :

$$u = 85140\sqrt{\frac{p_0 - p}{14357 + p_0 \times 10334}},$$

p et p sont dans cette formule exprimés en atmosphères.

499. Les différentes formules qui nous ont donné la valeur de u, fournissent la vitesse de la vapeur à la sortie, c'est-à-dire saturée sous la pression du milieu ambiant ; la dépense devra comporter un coefficient de correction que nous représenterons par φ ; cette dépense pendant une seconde sera :

$$V = S\varphi u,$$

S étant la section de l'orifice.

Le poids de vapeur écoulée pendant le même temps sera

$$Q = S\varphi u \frac{1}{\frac{1-q}{1000} + \frac{q(1+\alpha t).\,0,760}{1,293 \times 0,622 \times p}}.$$

Le volume de la vapeur du réservoir qui s'écoulera dans une seconde sera :

$$V_0 = S\varphi u \frac{\frac{1-q_0}{1000} + \frac{q_0(1+\alpha t_0)0,760}{1,293 \times 0,622 \times p_0}}{\frac{1-q}{1000} + \frac{q(1+\alpha t)0,760}{1,293 \times 0,622 \times p}},$$

et si on néglige, au point de vue du volume, l'eau entraînée ou condensée, on aura :

$$V_0 = S\varphi u \cdot \frac{q_0(1+\alpha t_0)p}{q(1+\alpha t)p_0} = \frac{q_0(273+t_0)p}{q(273+t)p_0} S\varphi u.$$

500. Si l'on suppose la vapeur sèche et la pression extérieure égale à une atmosphère, et si l'on admet des excès de pression égaux respectivement à :

0,5at	1	2	4	9

les fractions représentant la quantité de vapeur condensée seront :

0,025 0,042 0,065 0,094 0,130,

et les vitesses d'écoulement rapportées aux conditions de température et de pression de la vapeur seront :

260m,56 265m,31 235,57 184,73 122,58.

On voit que la vitesse d'écoulement doit présenter un maximum lorsque la pression du réservoir est voisine de 2 atmosphères.

Si l'on compare ces vitesses avec celles que l'on déduit de la formule $u = \sqrt{2gP}$, P étant l'excès de pression en colonne de vapeur ; on trouve respectivement pour ces dernières :

344m,93 426,28 500,46 560,41 614,49.

Si nous multiplions ces valeurs par le coefficient de contraction 0,54 que nous avons admis, il vient :

186m,26 230,19 270,25 302,62 331,82

Si ces dernières valeurs étaient supposées exactes, le coefficient de contraction qu'il y aurait lieu d'attribuer à la formule déduite de la théorie mécanique de la chaleur serait variable et prendrait les valeurs suivantes :

0,718 0,867 1,147 1,638 2,707

Il y aurait lieu de prendre ici comme dans le cas des gaz un coefficient de contraction allant en augmentant indéfiniment. Les valeurs relatives aux deux premières pressions fournissent pour le coefficient de correction des nombres plus élevés de $\frac{1}{6}$ environ que ceux qui ont été trouvés par M. Weisbach pour le cas de l'écoulement de l'air ; est-ce à dire qu'il y a lieu de modifier le coefficient de M. Weisbach pour l'appliquer aux vapeurs, ou bien faut-il augmenter celui que nous avons admis pour le cas des vapeurs ? En l'absence d'expériences précises, il est bien difficile de se décider sur la question. Peut-être fera-t-on bien, dans tous les cas, de considérer les résultats fournis par la formule $Q = 0,54\ S\ \sqrt{2gP}$ comme un minimum.

501. Quant à la formule déduite de la théorie mécanique de la chaleur, nous aurons à faire à son propos les mêmes réserves que nous avons faites lorsqu'il s'est agi de l'écoulement des gaz. Des

expériences nouvelles seraient nécessaires pour déterminer dans quelle limite cette formule s'accorde avec l'expérience. Si, comme cela a été observé dans le cas des gaz, il y avait lieu de lui appliquer un coefficient de correction allant toujours en augmentant, la valeur théorique de cette formule se trouverait gravement atteinte et il y aurait lieu alors de modifier les hypothèses qui ont servi à l'obtenir. A cet égard, des expériences bien faites viendraient certainement éclairer la théorie et permettraient probablement d'arriver à déterminer nettement les hypothèses d'où on devrait partir pour arriver à une formule exacte.

502. *Écoulement de la vapeur dans les tuyaux de conduite.* — La vapeur s'écoulant par des orifices comme les gaz comprimés, c'est-à-dire comme des liquides de même densité, il n'est pas douteux qu'elle ne se comporte comme les gaz, dans les tuyaux de conduite; cependant il y a lieu de tenir compte, dans ce cas, d'un élément de plus, à savoir la vapeur condensée dans le parcours du tuyau par suite du refroidissement de l'enveloppe.

503. En général, la quantité de vapeur condensée par la perte de chaleur du tuyau est très-petite relativement à la quantité de vapeur qui s'écoule. Considérons, par exemple, un tuyau de 50 m. de longueur, de $0^{m},10$ de diamètre, parcouru par la vapeur sous un excès de pression de $0^{m},20$ de mercure; la densité de la vapeur sera à peu près de 0,0007376; la vitesse due à la charge, de $267^{m},58$; la vitesse effective, en supposant le tuyau rectiligne, à peu près de 73 m. La section du tuyau étant de $0^{mq},00785$, le volume écoulé par seconde sera de $0^{mq},00785.\ 73 = 0^{mc},573$; il sera par heure de $0,573.3600 = 2062^{mc},8$, dont le poids en kilog. est de $2062,8.\ 0,0007376.\ 1000 = 1521^{k},5$. Or, la surface du tuyau est de $0,1.\ 3,1415.\ 50 = 15^{mq},70$; et comme la quantité de vapeur condensée, par mètre carré et par heure, par le refroidissement des tuyaux de fonte, est à peu près de $1^{k},8$, la quantité totale de vapeur condensée par le tuyau sera de $1,8.\ 15,7 = 28^{k},26$, ou de 0,0185 de la vapeur qui s'écoule. On voit, d'après cela, qu'il faudrait que le tuyau eût une très-grande longueur, qu'il fût complétement exposé à l'air, et que l'excès de pression de la vapeur fût très-petit, pour que la quantité de vapeur condensée fût une partie notable de celle qui passe dans le tuyau.

En employant pour calculer la vitesse de l'écoulement de la vapeur la formule qui nous a servi pour l'écoulement des gaz dans un tuyau, on tiendra compte de la vapeur condensée par le refroidissement aussi bien que de celle qui se condense par la détente et de celle

qui est entraînée directement de la chaudière quand la vapeur n'est pas sèche, en modifiant convenablement la densité de la vapeur.

504. La formule déduite de la théorie mécanique de la chaleur dans le cas de l'écoulement en mince paroi s'applique au cas des tuyaux, à la condition de tenir compte des différentes résistances que subit la vapeur dans son parcours, et de la perte de chaleur que subit la vapeur pendant son parcours à travers le tuyau, perte qu'il sera toujours facile d'évaluer.

Si A représente cette quantité rapportée à 1 kilog. de vapeur qui s'écoule, et si M représente le second membre de l'équation qui donne la valeur de u (493) quand il n'y a ni chaleur gagnée, ni chaleur perdue extérieurement, on aura, A étant l'équivalent calorifique du travail :

$$A\frac{u_1^2}{2g}\left(1+\left(\frac{1}{\varphi^2}-1\right)+\frac{KL}{D}\right)=M-Q,$$

d'où

$$u_1=\sqrt{\frac{2g(M-Q)}{A\left(1+\left(\frac{1}{\varphi^2}-1\right)+\frac{KL}{D}\right)}}.$$

505. M. Rudler, ingénieur de la manufacture de tabac de Paris, m'a communiqué les résultats d'une expérience faite sur une grande échelle. Un tuyau de cuivre de 5 mètres de longueur, de $0^m,08$ de diamètre, recourbé deux fois à angle droit par un arc de cercle de $0^m,40$, était fixé sur une chaudière ; il a laissé échapper dans l'atmosphère 4500 kilog. de vapeur en deux heures et demie sous un excès de pression de $0^m,15$ de mercure. Le poids de la vapeur écoulée par seconde était de 4500 : (150.60) $= 0^k,5$; la densité de la vapeur étant 0,000728, le volume écoulé par seconde était de $0^{mc},6871$; la section de l'orifice étant $0^m,005026$, la vitesse d'écoulement était de $136^m,71$.

La vitesse d'écoulement, d'après la formule du n° 381, est :

$$v=V\sqrt{\frac{1}{1+A+\frac{KL}{D}+\frac{2i^0}{180^0}}}$$

dans laquelle V représente la vitesse due à la charge ; K, le coefficient de frottement 0,024 ; L et D, la longueur et le diamètre du tuyau ; A, le coefficient de perte de charge à l'embouchure ; et $i^0 : 180^0$, le coefficient de perte de charge pour chaque courbure. Dans le cas

dont il s'agit, $V = 238^m,53$; $KL : D = 1,5$; $A = 0,45$, et $i^0 = 90$; ce qui donne :

$$v = \frac{1}{1,99} V = 119^m587.$$

Pour expliquer la différence entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience, il suffirait d'admettre que la vapeur a entraîné une quantité d'eau égale à 0,063 de son poids.

M. Audémar, ancien élève de l'École centrale, a publié dans le *Bulletin de l'Industrie minérale*, année 1872, des expériences sur le mouvement de la vapeur dans les grandes conduites.

Il rappelle d'abord d'anciennes expériences faites à Lucy et dans lesquelles la longueur des tuyaux était de 2000 m., leur diamètre de $0^m,08$; la dépense de vapeur de 94 litres par seconde et la différence de pression au commencement et à la fin de la conduite de 1 atm. et demie.

La perte de charge exprimée en colonne d'eau est exprimée par

$$\frac{KL}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot d ;$$

v étant la vitesse de la vapeur et d, sa densité par rapport à l'eau ; la vapeur étant à 5 atmosphères, on a :

$$d = \frac{0,001293 \times 0,622 \times 5}{1 + 0,00367 \times 154} = 0,0026,$$

la vitesse de la vapeur sera

$$V = \frac{0.094}{3.1416 \times 0,04^2} = 18^m,7.$$

La perte de charge enfermée en colonne d'eau est égale à :

$$10,35 \times 1,5 = 15,5.$$

On aura donc :

$$\frac{K \times 200 \times \overline{18,7}^2 \times 0,0026}{0,08 \times 19,62} = 15,5$$

d'où

$$K = 0,133.$$

Relativement à une expérience qui lui est personnelle, M. Audemar fournit les nombres suivants :

Longueur de la conduite...	403^{m}	
Diamètre de la conduite....	0^{m},20	
Vitesse de la vapeur.....	11^{m},4	
Pression de la vapeur.....	5^{atm}	
Perte de charge.....	0^{at},65	ou 6^{m},71 d'eau.

On a alors

$$\frac{K \times 403 \times 11{,}4^2 \times 0{,}0026}{0{,}20 \times 19{,}62} = 6{,}71,$$

d'où

$$K = 0{,}193.$$

Dans cette dernière expérience, les tuyaux étaient garantis contre le refroidissement par une épaisse couche isolante; la quantité de vapeur condensée a été :

Pour une pression de 3^{at} 1/4....	130 litres	par heure.
— — de 7^{at}.....	155	—
— — de 7^{at} 1/2....	165	—

La condensation est d'ailleurs sensiblement la même pendant sa marche et pendant l'arrêt de la machine.

La surface extérieure de la conduite étant de 300^{mq} environ, la condensation est donc de 0^{k},55 par mètre carré et par heure.

Nous pouvons ajouter, à titre de renseignement seulement, les nombres suivants relatifs à la conduite de vapeur établie à l'exposition de Londres en 1850.

La conduite principale se composait de 3 parties :

La première avait	57^{m},45	de long et 0^{m},203	de diamètre.
La deuxième —	116^{m},43	— 0^{m},152	—
La troisième —	130^{m},11	— 0^{m},102	—

La pression à l'origine de la conduite était de 3^{at},72, et à la fin de 3^{at},45; la perte de charge était donc de 0^{at},27; on ne peut rien conclure de cette donnée au point de vue de la valeur de K, parce qu'on ne connaît pas la dépense.

A Gorsy (Moselle), en 1842, MM. Thomas et Laurens ont établi une artère de vapeur de 250 m. de longueur; les tuyaux en fonte, de 0^{m},11 de diamètre, étaient placés dans un caniveau souterrain, et le vide laissé entre les tuyaux et les parois du caniveau était rempli par du mâchefer et des laitiers; cette vapeur était prise sur les générateurs de la forge et la pression oscillait entre 4 et 5 atmosphères;

la perte de charge était de un quart d'atmosphère environ ; la conduite alimentait une machine à vapeur de 20 chevaux ; en admettant une dépense de 20 kilogrammes de vapeur par cheval et par heure, on obtiendrait pour K la valeur 0,38, la vitesse de la vapeur dans la conduite étant de $4^m,8$.

De l'ensemble de ces expériences, il résulte que le coefficient K doit, dans la pratique industrielle, avoir pour la vapeur une valeur beaucoup plus considérable que celle que l'on prend dans le cas des gaz ; il semble aussi résulter de ce que nous venons de dire que la valeur du coefficient s'accroît quand la vitesse diminue dans la conduite, en effet nous avons trouvé :

Pour une vitesse	de	$4^m,8$.....	$K = 0,38$
—	—	de $11^m,4$.....	$K = 0,193$
—	—	de $18^m,7$.....	$K = 0,133$
—	—	de $136^m,7$.....	$K = 0,024$

CHAPITRE XI

Anémomètres et manomètres.

506. *Anémomètres.* — Dans un grand nombre de circonstances, il est nécessaire de mesurer la vitesse d'un gaz qui s'écoule. On a essayé dans ce but à plusieurs reprises d'employer un appareil analogue au moulinet de Woltmann, dont on se sert pour mesurer la vitesse des cours d'eau ; mais on ne connaissait pas la relation entre la vitesse de rotation et la vitesse de l'air. En 1820, M. Kallsténius employa un moulinet à douze ailes, pour mesurer la vitesse de l'air qui sortait de la cheminée d'un four à réverbère, et il fit usage d'une formule qu'il n'avait point vérifiée par l'expérience, et qui est inexacte. En 1838, M. Combes s'est de nouveau occupé de cette question, et il a fait construire un appareil, maintenant généralement employé, dans lequel la relation entre la vitesse v de l'air et le nombre N de tours de la roue est donnée par la formule

$$v = a + bN,$$

a et b étant des constantes. Cette formule qui résulte de considérations théoriques, a été confirmée par l'expérience.

507. Cet instrument (*fig.* 43) se compose d'un axe très-délié, AB,

terminé par deux pivots très-fins tournant dans des chapes d'agate, que portent deux montants S,S′ et sur lequel sont montées quatre

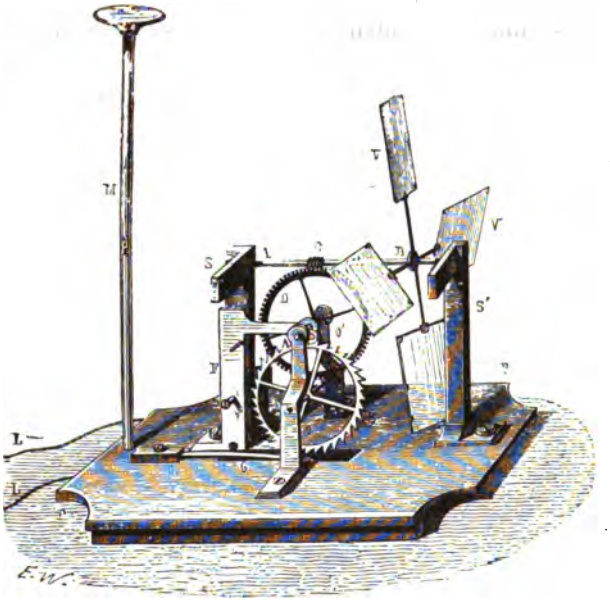


Fig. 43.

ailes planes V, également inclinées sur un plan perpendiculaire à l'axe. Celui-ci porte une vis sans fin C, conduisant une roue de 100 dents D, qui avance d'une dent par chaque révolution de l'axe AB. L'axe de cette roue porte une petite came qui peut agir sur une roue à rochet E de 50 dents; ce rochet est maintenu par un ressort G d'acier très-flexible, attaché sur la plaque horizontale PP qui porte l'instrument. A chaque révolution complète de la roue D, la came fait sauter une dent du rochet; les deux roues sont numérotées de 10 en 10 dents, la première de 1 à 10, la seconde de 1 à 5. Des aiguilles indicatrices, fixées aux montants S et F, servent à marquer le nombre de dents dont chaque roue a avancé, et, par suite, à indiquer le nombre des révolutions de l'axe. Au moyen d'une détente et de deux cordons L, qui servent à la faire mouvoir, on peut, à distance, arrêter le mouvement de rotation des ailes, ou leur permettre de tourner sous l'impulsion du courant d'air qui les frappe.

M est une tige verticale fixée sur la plaque, servant à porter l'*anémomètre* et à le maintenir dans la boîte.

508. Pour se servir de cet instrument, on amène d'abord le zéro

de chacune des roues vis-à-vis des deux aiguilles indicatrices, puis on place l'instrument sur un support dans la section transversale du canal où circule l'air, l'axe des ailettes étant dans la direction du courant, et l'arrêt étant placé de manière à s'opposer au mouvement. On s'éloigne de l'instrument, on lâche la détente à un instant donné, et on laisse tourner l'appareil pendant deux ou trois minutes; on tire alors le cordon qui doit arrêter le mouvement, et on lit le nombre des tours effectués pendant la durée de l'expérience. Il ne reste plus qu'à déduire, de la formule correspondante à l'instrument qu'on a employé, la vitesse d'écoulement de l'air.

509. Pour chaque appareil, on détermine les constantes a et b de la formule, en le fixant à l'extrémité d'une barre horizontale, qui reçoit un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe vertical, au moyen d'un mécanisme d'horlogerie dont on règle la vitesse en faisant varier l'inclinaison des ailes du volant. C'est en déterminant ainsi les constantes a et b d'un même appareil, par un grand nombre d'expériences, que M. Combes a vérifié l'exactitude de la formule.

La disposition que je viens de décrire, et qui a été la première exécutée, avait un inconvénient; on comptait le temps à partir d'un instant où la roue était en repos, et comme elle ne prend pas instantanément la vitesse qu'elle conserve jusqu'à la fin de l'expérience, il pouvait en résulter une certaine erreur; mais ce temps est très-court, à en juger par la rapidité avec laquelle les roues à ailettes se mettent en mouvement; d'ailleurs, les constantes de la formule de l'appareil ayant été déterminées dans les mêmes circonstances, l'erreur, si elle était sensible en réalité, n'existerait pas dans l'usage de ces appareils, à moins qu'il n'y eût une grande différence entre la durée des expériences qu'on fait et la durée de celles qui ont servi à la détermination des constantes. Mais, depuis, on a disposé l'appareil de manière à faire disparaître la cause d'erreur dont il est question : l'arrêt, au lieu d'agir sur l'axe de rotation, agit sur l'engrenage de la première roue, de sorte que les aiguilles peuvent ne commencer à tourner que lorsque la roue à ailettes a pris toute sa vitesse.

La détermination des constantes a et b de l'anémomètre exige certaines précautions, c'est ainsi qu'en 1862 un anémomètre de Newman avait été *taré* en le plaçant à l'extrémité d'une poutre de section carrée ayant environ $0{,}20^m$ sur 0^m20, de section; la formule trouvée avait été différente de celle trouvée par Newmann,

celui-ci fit fixer à l'extrémité de la poutre une tige de fer plat de $0^m,006$ d'épaisseur et on retrouva les nombres qu'il avait indiqués. Il est facile de comprendre la raison de la différence : la poutre comprime l'air devant elle sur une surface très-grande relativement à celle de l'anémomètre et fait le vide par derrière; il en résulte un accroissement de la vitesse relative de l'air, et l'instrument ainsi taré devra fournir ensuite des résultats trop faibles.

Il est encore une considération que nous n'avons vu signaler nulle part; c'est celle de la densité du gaz qui agit sur l'anémomètre; la vitesse de rotation que prend l'instrument doit être telle que l'action exercée sur les ailes par le courant gazeux est équilibrée par les frottements de l'appareil; or l'action exercée par le courant gazeux dépend non-seulement de la vitesse de ce courant, mais encore de la masse choquante. Il en résulte que les coefficients a et b doivent être modifiés suivant la nature du courant gazeux dans lequel l'anémomètre est placé et aussi suivant la *température* du gaz; l'influence de la température en modifiant la densité.

510. L'anémomètre de M. Combes est un instrument d'un usage général pour les appareils de ventilation; il est indispensable à tous les ingénieurs qui s'occupent de chauffage; car, ainsi que nous le verrons dans la suite, il n'y a presque point de chauffage qui ne doive être accompagné d'une certaine ventilation, qu'il est toujours utile et souvent nécessaire de mesurer.

511. M. Morin, directeur du Conservatoire des Arts et Métiers, a fait construire un anémomètre disposé à peu près comme celui de M. Combes, seulement les roues portent des aiguilles à godets

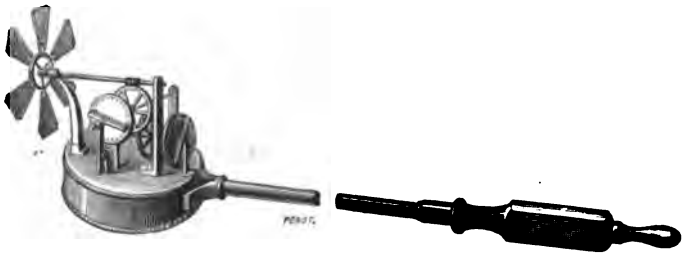


Fig. 44.

(*fig.* 44); M. Morin a employé le même mode de graduation que M. Combes, et il est arrivé à la même formule. Les expériences de graduation ayant été faites sur des vitesses beaucoup plus grandes

que celles qui avaient été employées par M. Newman, confirment l'exactitude de la formule de M. Combes pour de grandes vitesses.

L'anémomètre de M. Morin, fort bien exécuté par M. Bianchi, est d'un usage plus commode et plus exact que celui de M. Combes. Au moyen d'un pointage que permettent les aiguilles à godets, les cadrans portent des traces du commencement et de la fin des expériences; de plus la disposition de l'instrument est telle qu'il peut occuper toutes les positions possibles et que l'accès de l'air sur les aubes n'est obstrué par aucune des pièces du mécanisme; enfin l'expérience peut se prolonger beaucoup plus longtemps, car on peut compter jusqu'à 500,000 tours de l'instrument.

Une très-longue durée dans les expériences est un avantage réel, quand le courant éprouve de grandes perturbations; mais en général les veines partielles ont des vitesses à peu près constantes, très-variables d'un point à un autre dans la même section, et il est plus avantageux de multiplier les expériences dans différents points de la section, que de les prolonger sur un même point.

512. Il est important de remarquer que, quand l'anémomètre est placé dans des canaux d'une grande section, comme les veines élémentaires ont des vitesses en général très-inégales, il faut le fixer successivement dans un grand nombre de points différents, pour obtenir une vitesse moyenne. Si le tuyau était circulaire ou carré, ce qui arrive ordinairement, et assez long pour que l'on puisse admettre que les vitesses des veines élémentaires soient les mêmes à la même distance du centre, et si on avait observé la vitesse en différents points, il est évident que, pour obtenir la vitesse moyenne, il faudrait multiplier chacune de ces vitesses par la circonférence du cercle correspondant, et diviser la somme de ces produits par la somme des circonférences; dans ce calcul, les circonférences pourraient être remplacées par les rayons; mais, comme nous l'avons déjà dit, la vitesse des veines situées à un tiers du rayon à partir de la surface donnerait une valeur suffisamment approchée de la vitesse moyenne. Si le tuyau parcouru par l'air avait un diamètre peu différent de celui du cercle décrit par les extrémités des ailes de l'instrument, il est évident que l'anémomètre ne donnerait la vitesse qu'autant qu'il aurait été gradué, c'est-à-dire que les constantes auraient été déterminées en plaçant l'instrument dans les mêmes circonstances; c'est ce que la commission chargée de l'examen des appareils de chauffage et de ventilation de la prison Mazas a été obligée de

faire, pour mesurer la vitesse d'écoulement de l'air par les tuyaux de descente.

513. Newman construisait un anémomètre qu'il appelait anémomètre statique et qui est tout particulièrement propre à l'analyse des courants d'air au point de vue des vitesses que possèdent les différents points de leur section : l'axe des ailettes porte une vis sans fin qui engrène avec une roue dentée ; l'axe de cette roue dentée est fixé en un de ses points à l'une des extrémités d'un spiral ; de montre dont l'autre extrémité est attachée en un point du support de l'axe, les ailettes tournent jusqu'à ce que l'action exercée sur elle par le courant gazeux soit équilibrée par la tension du spiral une aiguille fixée à l'axe de la roue tourne sur un cadran qui porte les indications des vitesses ; un système de débrayage permet de ramener l'aiguille au zéro pour une expérience suivante. L'appareil doit être gradué directement pour chacune des vitesses à observer. L'avantage de cet instrument est de donner immédiatement, sur place et sans calcul, la valeur de la vitesse du courant gazeux. Son exactitude est peut-être un peu moins grande que celle des anémomètres précédemment décrits ; on estime que l'erreur peut s'élever à $\frac{1}{20}$ de la vitesse observée. Mais, dans un grand nombre de cas, la très-grande rapidité de l'observation et la commodité de l'instrument peuvent rendre l'emploi de cet anémomètre très-avantageux.

514. *Appareil de M. Van Hecke.* — M. Van Hecke a imaginé un appareil qui enregistre la ventilation et donne une mesure du volume d'air qui s'est écoulé pendant un temps quelconque, quelques minutes, quelques heures, quelques jours et même une année. Cet appareil, n'est autre chose qu'un grand anémomètre à deux ailes, placé dans l'axe du tuyau. Les deux ailes, inclinées à peu près à 45° s'étendent du centre à la circonférence. Leur mouvement est transmis, au moyen d'une chaîne sans fin, à une série de roues dentées portant chacune une aiguille qui parcourt un cadran divisé en 100 parties égales ; le premier cadran indique le nombre des tours ; le second, les centaines de tours ; le troisième, les dix mille tours ; et le quatrième, les millions de tours. En observant à deux époques quelconques les positions des aiguilles sur les quatre cadrans, on peut en déduire les nombres de tours effectués dans l'intervalle, et si, par des mesures anémométriques, on a déterminé la vitesse d'écoulement correspondante à chaque révolution des ailes, on en déduira facilement le volume d'air écoulé dans l'intervalle en question.

Cet instrument a, comme tous les autres dans lesquels l'air agit pour mettre un corps en mouvement, l'inconvénient de diminuer la vitesse par le rétrécissement de la section ; mais la diminution de la vitesse est faible, si les ailes n'ont pas une grande largeur. La moindre déformation des ailes, la moindre altération à l'une de ses parties modifie les résultats, et il est par suite indispensable de vérifier fréquemment le règlement de l'appareil. On ne peut l'employer que lorsqu'on a déterminé par des mesures anémométriques, et pour différentes vitesses, la vitesse moyenne de l'air dans le canal. Il n'est pas douteux que la formule relative à ce grand anémomètre ne soit de la même forme que la formule relative à l'anémomètre de M. Combes, $v = a + bn$. J'ajouterai que cet instrument doit indiquer une vitesse peu différente de la vitesse moyenne, car sa vitesse résulte de l'impulsion de toutes les veines alimentaires.

515. *Appareils donnant une mesure permanente de la vitesse.* — Lorsque les appareils ventilateurs fonctionnent d'une manière continue, il est souvent important d'avoir un instrument qui indique à chaque instant la vitesse d'écoulement de l'air, ou du moins si la ventilation est comprise dans certaines limites. Ces instruments sont indispensables dans l'exploitation des mines, dans les prisons cellulaires, les hôpitaux, etc., parce que l'état sanitaire dépend de la vitesse du renouvellement de l'air.

516. On pourrait d'abord placer dans le canal de ventilation un anémomètre de M. Combes, qui serait toujours en mouvement, et qui ferait mouvoir une aiguille placée derrière une vitre ; le nombre des tours parcourus par l'aiguille, dans une minute par exemple, indiquerait, d'après la formule de l'anémomètre, la vitesse d'écoulement; mais l'instrument, toujours en activité, pourrait s'altérer au contact des matières étrangères que l'air entraîne avec lui, et donner des indications inexactes.

On pourrait aussi ne placer dans le canal que la roue à ailettes et l'axe fileté qui se prolongerait en dehors et agirait sur une aiguille maintenue par son poids ou par un ressort ; l'aiguille s'écarterait d'autant plus de sa position primitive que la pression exercée sur la roue à ailettes, pour la faire tourner, serait plus considérable. Cette disposition n'a point encore été employée.

517. *Anémomètre totalisateur de M. Bianchi.* — Le compteur de cet anémomètre peut donner jusqu'à un milliard de tours, ce qui permet dans beaucoup de cas de déterminer le résultat de toute une année de ventilation, sans sortir des limites que peut fournir le

nous avons parlé, presente cet avantage que le compteur peut être placé dans le cabinet même du chef de l'établissement, qui peut ainsi exercer à chaque instant son contrôle, sans dérangement.

Il sera toujours utile de vérifier de temps en temps l'instrument, qui peut à la longue subir des altérations ; on le fera facilement en le comparant avec un bon anémomètre portatif (*Annales du Conservatoire*, 1864).

519. Quand la vitesse est considérable, qu'elle correspond à une charge de quelques centimètres d'eau, un manomètre à eau, placé en dehors de la conduite, pourrait indiquer à chaque instant la charge correspondante à la vitesse moyenne. Il suffirait pour cela, comme nous l'avons déjà indiqué n° 472, que les deux extrémités des branches du manomètre fussent mises en communication (*fig.* 47), l'une avec un tube placé perpendiculairement à la surface du tuyau de conduite, et dont l'extrémité serait à fleur de cette surface, et l'autre avec un petit tube placé dans la conduite, recourbé parallèlement à son axe, au tiers du rayon à partir de la surface, et de manière à recevoir la pression de la veine. Mais comme, dans la position que je viens d'indiquer, la pression pourrait ne pas correspondre exactement à la vitesse moyenne, il faudrait, par des expériences anémométriques, dresser un petit tableau des volumes d'air écoulés, pour un certain nombre de hauteurs manométriques. Il est évident que, si les mouvements relatifs des veines n'étaient pas changés, les vitesses d'écoulement devraient être proportionnelles aux racines carrées des pressions manométriques.

Fig. 46.

520. Mais ce procédé suppose nécessairement que les charges correspondantes aux vitesses peuvent être appréciées par un manomètre à eau ; et pour cela, il faut qu'elles soient très-grandes ; car pour des vitesses de

1m	2	3	4	5	6	7	8	9	10

les charges en millimètres d'eau sont :

0,065	0,26	0,585	1,04	1,625	2,34	3,18	4,16	5,26	6,50.

Or, comme dans les grands appareils de ventilation les vitesses d'écoulement dépassent rarement 2^m, et que la charge correspondante en eau est de $0^{mm},26$, on voit que l'appareil dont il vient d'être question ne pourrait pas être employé. Cependant, dans un grand nombre de circonstances, il est de la plus grande importance d'avoir des indicateurs permanents de la vitesse.

521. Quand la ventilation a lieu par une machine qui pousse l'air dans les lieux à ventiler, la pression à l'origine de la conduite est toujours considérable, parce qu'elle se compose de celle qui produit le mouvement et de celle qui correspond aux résistances de toute espèce. De même, quand la ventilation se fait par un appel produit par une cheminée ou par une machine, la détente de l'air, au bas de la cheminée ou à l'entrée de la machine, est toujours beaucoup plus grande que la charge qui correspond à la vitesse de l'air, parce que cette détente représente, comme dans le cas précédent, non-seulement la charge correspondante à la vitesse, mais encore la somme des charges perdues dans tout le trajet; or, comme dans tous les grands appareils de ventilation la vitesse d'écoulement est presque toujours comprise entre un tiers et un quart de la vitesse théorique, il s'ensuit que la dépression, au bas de la cheminée d'appel ou à l'entrée de la machine, est de 9 à 16 fois plus considérable que la charge correspondante à la vitesse d'écoulement. Si la vitesse était égale à 2 m., la dépression serait comprise entre $0^{mm},26.9 = 2^{mm},34$ et $0^{mm},26.16 = 4^{mm},16$. Cette charge pourrait se mesurer avec un manomètre à eau, dont une des branches communiquerait avec un tube débouchant perpendiculairement à la surface intérieure du bas de la cheminée et à fleur de cette surface, ou dans un espace qui précéderait l'orifice d'appel de la machine. La communication avec le manomètre pourrait s'effectuer au moyen de petits tubes en métal ou en caoutchouc, et le manomètre pourrait être placé à une distance quelconque de la cheminée ou de la machine. Mais, les hauteurs manométriques étant encore très-petites, il y aurait beaucoup de chances d'erreurs dans l'estimation des vitesses correspondantes aux pressions ; il faudrait alors disposer l'appareil de manière que ses indications fussent égales à 10 ou 20 fois les hauteurs qui correspondent aux charges réelles, c'est-à-dire qu'on devrait employer des manomètres multiplicateurs dont le coefficient de réduction fût connu. J'ai essayé pour cela différentes dispositions que j'indiquerai successivement.

Dans tous ces appareils, la détermination du coefficient de réduc-

tion, c'est-à-dire du nombre par lequel il faut diviser l'indication de l'échelle pour obtenir la pression réelle, et la vérification de l'échelle exigent l'emploi d'un instrument au moyen duquel on puisse mesurer avec une grande précision des excès de pression, depuis quelques millimètres jusqu'à un ou deux centimètres ; je commencerai donc par décrire les différentes dispositions que j'ai employées pour obtenir cette mesure. Il est important de remarquer que ces derniers instruments diffèrent complétement des premiers, en ce que dans ceux-ci la mesure de la pression exige des expériences, tandis que, dans les manomètres multiplicateurs, l'indication de la pression est permanente et peut se lire sur une échelle ou sur un cadran.

522. *Appareils de précision pour mesurer de petits excès de pression.* — Le premier appareil dont je me suis servi consistait en un tube de verre, de 4 millimètres de diamètre, formé de deux branches verticales réunies à la partie inférieure par une branche à courbure très-faible ; les extrémités des branches verticales étaient garnies de robinets, et l'une d'elles communiquait avec une caisse en cuivre, pleine d'air, fermée et entourée d'eau et de bois pour éviter les variations brusques de température ; le volume intérieur pouvait être augmenté ou diminué au moyen d'une vis qu'on faisait mouvoir à l'aide d'une manivelle ; la vis portait un cercle divisé en 100 parties, qui parcourait une échelle divisée en millimètres. Pour se servir de cet instrument, on introduisait une bulle d'eau dans le tube horizontal ; en mettant les extrémités des branches verticales en communication avec l'air, la bulle se plaçait au milieu du tube ; si on faisait alors communiquer l'espace dont on voulait mesurer l'excès de pression avec l'extrémité de l'une des branches verticales, et le réservoir d'air avec l'autre branche, la bulle d'eau marchait du côté de la plus faible pression, et on pouvait la ramener à sa position primitive en augmentant ou en diminuant le volume du réservoir d'air au moyen de la vis ; l'équilibre étant rétabli, l'accroissement ou la diminution du volume du réservoir d'air conduisait facilement à la détermination de la différence des pressions. Cet appareil a un grave inconvénient, résultant des variations de température que l'air du réservoir éprouve par sa compression ou sa dilatation, de sorte qu'il faut attendre assez longtemps pour obtenir une position fixe de la vis. J'avais pensé à le simplifier en employant un tube de verre disposé de la même manière, mais dont la partie inférieure était très-longue et divisée en parties d'égale capacité ; les deux branches

verticales communiquant avec l'air, on pouvait facilement amener la bulle d'eau renfermée dans le tube horizontal en un point quelconque de la division ; alors, en faisant communiquer une des branches avec l'espace dont on voulait mesurer l'excès de pression et l'autre avec le réservoir d'air, la bulle elle-même, par son mouvement, augmentait ou diminuait le volume d'air du réservoir, et la marche de la bulle permettait de déterminer directement l'excès de pression quand on connaissait le rapport du volume d'une division à celui du réservoir. Mais cette disposition aurait présenté le même inconvénient que la première ; et, comme j'ai reconnu qu'on pouvait mesurer avec une très-grande précision la hauteur de l'eau dans un manomètre ordinaire, j'ai renoncé à ces appareils compliqués, et je me suis servi de celui que je vais décrire.

523. *Manomètre ordinaire à grande précision.* — Cet appareil, représenté en perspective figure 48, se compose d'un vase à base carrée A, en cuivre mince, de $0^m,20$ de côté et de $0^m,135$ de hauteur, fermé de toutes parts et à moitié plein d'eau; il est muni vers la partie inférieure d'une douille dans laquelle est mastiqué le tube de verre B, de $0^m,02$ de diamètre. Au-dessus de ce tube, se trouve une pièce de cuivre servant d'écrou à une vis D, ayant $0^m\,001$ de pas, terminée inférieurement par une pointe et supérieurement par un bouton, au-dessous duquel se trouve une plaque circulaire C divisée en 100 parties égales, dont la circonférence parcourt l'échelle E divisée en millimètres. N est un niveau à bulle d'air ; F, un robinet permettant d'introduire de l'eau dans le réservoir A ; H, un tuyau destiné à établir la communication du réservoir avec l'espace dont on veut mesurer la pression ; R, un autre robinet destiné à élever de l'eau du réservoir A. Pour se servir de cet appareil, on commence par fermer le robinet H ; alors, en ouvrant le robinet F, la pression intérieure devient égale à la pression extérieure, et on abaisse la vis jusqu'à ce que sa pointe inférieure touche le liquide, ce qui se reconnaît très-facilement en observant l'image de la pointe sur la sur-

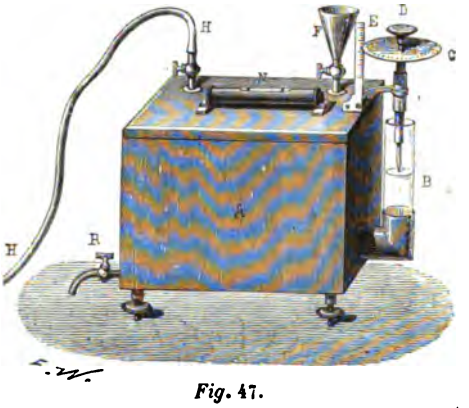


Fig. 47.

face du liquide; à l'instant où le contact a lieu, la surface du liquide change brusquement, et on peut tenir avec la plus grande précision l'instant du contact; on observe alors la hauteur du cadran C sur l'échelle, en millimètres et en centièmes de millimètres; ensuite on remonte la vis, on ferme le robinet F, et on ouvre le robinet H, et, suivant qu'il se produit dans le vase une pression plus grande ou plus petite que celle de l'atmosphère, le liquide monte ou descend dans le tube B. On ramène la pointe de l'aiguille au niveau de l'eau, et on observe, comme précédemment, la hauteur du cercle C; la différence des hauteurs observées indiquera l'excès de pression; mais le résultat de l'observation doit d'abord éprouver deux corrections. La première est relative à l'abaissement de niveau dans le réservoir A. Désignons par S la section du vase, par s celle du tube B, par h et h' les variations de niveau du liquide dans les vases communiquants pour un excès de pression H; on aura $H = h + h'$, et $h.\ S = h'.s$; et par suite $H = h'(S+s) : S$. Dans le cas de l'appareil décrit, $S = 0{,}04$, $s = 0{,}000314$; $(S+s) : S = 1{,}0078$; et $H = 1{,}0078h'$. La seconde correction est relative au pas de la vis, qui n'est jamais exactement égal à 1 millim.; cette corrections 'obtient facilement en faisant marcher la vis d'un bout à l'autre de l'échelle et en comparant le nombre des tours de la vis au nombre des divisions de l'échelle parcourue.

524. *Manomètre à tube incliné.* — Cet appareil, représenté figure 48, est semblable à celui dont je me suis servi dans mes expériences sur le mouvement de l'air dans les tuyaux (322); mais, pour

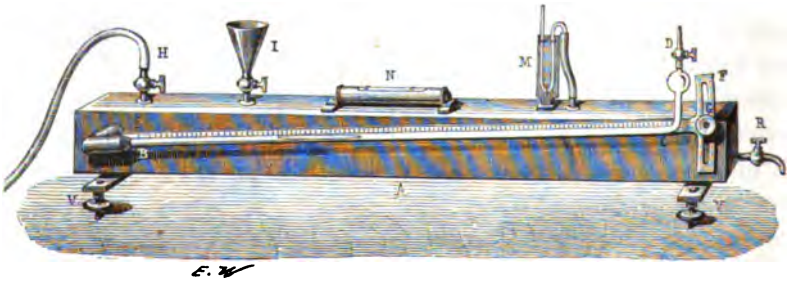


Fig. 48.

l'usage dont il est question, je lui ai fait subir quelques modifications. A est une caisse en laiton mince, de $0^m,60$ de longueur, de $0^m,10$ de hauteur et de $0^m,05$ de largeur; elle est portée sur trois pieds à vis V, qui permettent de la rendre horizontale au moyen du niveau fixe N;

un tube de verre BCD est fixé dans une douille en cuivre recourbée à angle droit, et cette partie de la douille pénètre dans la caisse à travers un bouchon de liége maintenu par une douille intérieure. Le tube est fixé sur une règle de cuivre EF, divisée en centimètres et en millimètres, à laquelle on peut donner différentes inclinaisons et qu'on maintient en place par la vis calante G ; H est une douille à robinet, destinée à établir par un tube en caoutchouc la communication avec l'espace dont on veut mesurer la pression ; I est une autre douille à robinet, garnie d'un entonnoir, destinée à faire communiquer l'intérieur de la caisse avec l'air, ou à y introduire de l'eau ; M est un manomètre ordinaire ; R, un robinet destiné à vider la caisse ; D, une douille à robinet, qui termine le tube de verre.

Pour se servir de cet instrument, on commence par établir le niveau au zéro, au moyen des vis calantes ; si l'on veut mesurer un excès de pression, on amène le niveau de l'eau dans le tube au bas de l'échelle, au moyen des deux robinets I et R, et on comprime l'air du réservoir en soufflant par le tube D, jusqu'à ce que le manomètre M indique un excès de pression de 1 ou 2 centimètres ; puis on règle l'inclinaison du tube BCD de manière que la course du liquide soit égale à celle du manomètre M multipliée par 10, 15 ou 20, suivant qu'on veut obtenir des indications 10, 15 ou 20 fois plus grandes que les excès réels de pression ; pour des tubes de verre de 4 à 5 millimètres de diamètre intérieur, il ne faut pas dépasser ces nombres, parce que, quand le tube est trop peu incliné à l'horizon et qu'on rétablit la pression dans le réservoir, le niveau du liquide ne revient pas au point de départ, et que, pour de petites variations de pression, la colonne liquide ne chauge pas de longueur. L'inclinaison une fois déterminée, on fixe invariablement le tube au moyen de la vis G.

Pour mesurer une dépression, il faudrait évidemment que le niveau du liquide dans le tube fût au haut de l'échelle, quand le réservoir communique avec l'atmosphère. S'il s'agit de mesurer l'appel produit par une cheminée, on fait communiquer la douille H avec le bas de la cheminée : supposons que la colonne d'eau parcoure une longueur h sur l'échelle inclinée ; si on connaissait la longueur h', correspondante à une vitesse v, mesurée au moyen de l'anémomètre, on aurait évidemment, pour la vitesse x correspondante à la longueur h, $v^2h = x^2h'$, et par suite

$$x = v\sqrt{\frac{h}{h'}}.$$

On pourrait alors former une table qui donnerait les vitesses x, correspondantes aux valeurs de h observées. Pour connaître le degré d'exactitude qu'on obtiendrait par cette méthode, supposons qu'on ait $h' = 23^{mm},4$, quand la vitesse d'écoulement est de 2 m.; pour $h = 22^{mm},4$, la vitesse d'écoulement serait de $1^{m},97$. Ainsi, une erreurde 1 millimètre sur l'estimation de la pression ne causerait pas d'erreur sensible dans le calcul de la vitesse.

525. M. Scheurer-Kestner a modifié l'emploi de cet appareil en substituant l'alcool à l'eau; il a observé que, par cette substitution, la colonne liquide acquiert une grande mobilité; avec l'eau, la capillarité s'oppose souvent au passage libre du liquide dans le tube qui fréquemment ne se mouille pas, surtout quand il a servi quelque temps: le moindre grain de poussière fait obstacle à la marche de la colonne liquide; avec l'alcool qui dissout les matières grasses, on n'a pas de pareils inconvénients à craindre. M. Scheurer-Kestner a fait à l'aide de cet instrument ainsi modifié des expériences sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir dans l'étude de la marche des foyers.

526. *Manomètre à flotteur.* — Cet appareil est représenté figure 49. La caisse A, en cuivre mince, a $0^{m},58$ de longueur, $0^{m},07$ de hauteur, $0^{m},13$ de largeur; des pieds à vis V et un niveau N servent à la placer horizontalement. Cette caisse est fermée en dessus, et renferme une tubulure intérieure B de $0^{m},12$ de diamètre dans laquelle le liquide de la caisse tend à se mettre de niveau; dans cette tubulure est un flotteur C en cuivre mince, lesté de manière que la ligne de flottaison soit à peu près au milieu de sa hauteur; il est soutenu par un fil qui s'enroule sur une poulie D, fixée sur un axe très-mobile; l'autre extrémité du fil est attachée dans la gorge de la poulie, qui porte une seconde gorge avec un second fil terminé par un contre-poids p; l'axe de la poulie porte une longue aiguille EP, en bois très-mince, équilibrée par un contre-poids E et dont l'extrémité P parcourt un cadran GK divisé en centimètres et en millimètres; une douille à robinet H est destinée à établir la communication entre le réservoir d'air de la caisse et l'espace dont on veut mesurer l'excès de pression sur celle de l'atmosphère; une autre douille I permet d'établir dans l'intérieur de la caisse la pression extérieure, ou d'y verser de l'eau; le robinet R sert à enlever de l'eau de la caisse. Pour se servir de cet appareil, on commence par le placer horizontalement au moyen des pieds à vis et du niveau; ensuite on ouvre le robinet I, et on introduit de l'eau dans la caisse, de manière que

l'extrémité de l'aiguille se trouve sur le zéro du cadran ; on ferme alors le robinet I, et on établit par le robinet H la communication de la caisse avec l'espace dont on veut mesurer la pression. La section de la caisse étant de $0^{mq},0717$, et celle du cylindre dans lequel se trouve le flotteur étant de $0^{mq},0113$, le mouvement du flotteur

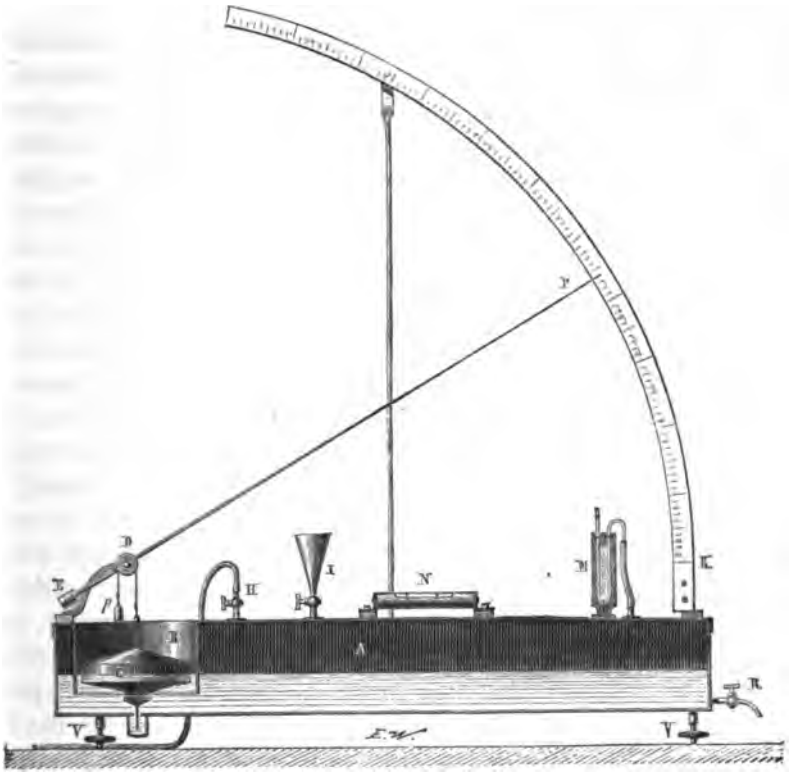


Fig. 49.

devra être multiplié par $(0,0604 + 0,0113) : 0,0604 = 1,18$ pour donner la variation de niveau due à l'excès de pression. La longueur de l'aiguille étant de $0^{m},50$ et le rayon de la gorge de la poulie de $0^{m},01$, le mouvement de l'extrémité de l'aiguille est égal à 50 fois celui du flotteur ; ainsi la charge en millimètres d'eau est égale à $n.1,18 : 50$, n représentant le nombre de millimètres parcourus par l'extrémité de l'aiguille. La longueur du cadran étant de $0^{m},7853$ et chaque moitié de $0^{m},3926$, l'appareil pourra indiquer des excès de pression positifs ou négatifs compris entre $1,18 : 50 = 0^{mm},023$ et

1,18.39,2 : 50 = $9^{mm},25$. Pour déterminer le rapport des chemins parcourus par l'extrémité de l'aiguille et par le flotteur, il ne faudrait pas s'en rapporter uniquement à la mesure du rayon de la poulie et de celle du cadran, car une petite erreur sur le premier rayon aurait une trop grande influence; il faudrait déterminer ce rapport par quelques mesures directes de l'excès de pression au moyen du manomètre décrit précédemment (525).

527. *Manomètre à cloche.* — L'appareil que j'ai fait construire était composé d'une cloche en cuivre mince, de $0^m,50$ de diamètre et de $0^m,10$ de hauteur; elle plongeait par sa partie inférieure dans un réservoir d'eau annulaire en fer-blanc, dont le cylindre intérieur était fermé par le haut; la cloche était suspendue par un fil qui s'enroulait sur une poulie de $0^m,05$ de diamètre, mobile autour d'un axe fixe; une autre poulie, montée sur le même axe, mais de $0^m,10$ de diamètre, supportait un poids qui faisait équilibre à celui de la cloche; sur le même axe était fixée une aiguille équilibrée, dont l'extrémité parcourait une portion de cercle divisée en degrés et minutes; un tube, pouvant communiquer avec l'espace dont on voulait mesurer la pression ou avec l'air extérieur, s'ouvrait au-dessous de la cloche dans la plaque qui fermait le cylindre intérieur du réservoir annulaire; l'appareil était rendu horizontal par des vis. L'aiguille étant amenée au zéro du cadran quand la pression intérieure est égale à la pression extérieure, en établissant la communication avec le lieu dont on veut mesurer la pression, la cloche montera ou descendra, suivant que la pression sera plus grande ou plus petite, et cela jusqu'à ce que le poids de 5 grammes, qui s'est porté à droite ou à gauche, fasse équilibre à l'excès de pression. En désignant par S la projection horizontale de la cloche en centimètres carrés, par P le poids placé à la distance l de l'axe de rotation, par i l'angle d'inclinaison de l'aiguille sur sa position verticale, et par p l'excès de pression du gaz de la cloche sur la pression atmosphérique, on aura évidemment $Sp = Pl \sin i$. Pour les dimensions de l'appareil décrit, on a S = 2152 en centimètres; P = 5; $l = 5$, et par suite $\sin i = 86,08\,p$; alors pour $p = 0^c,001$, qui correspond à une hauteur d'eau d'un centième de millimètre, on aurait $\sin i = 0,086$, valeur qui correspond à 4° 29′. Comme, dans cet appareil, une légère inexactitude sur la valeur de l aurait une grande influence, et qu'il y a une erreur inévitable résultant de l'immersion plus ou moins considérable de la cloche dans l'eau, il faudrait graduer l'instrument en observant les déviations de l'aiguille correspondantes à un certain nombre d'excès

de pression; et en traçant une courbe dont les abscisses seraient les pressions, et les ordonnées les déviations de l'aiguille, on formerait facilement une table approchée des pressions correspondantes aux déviations. Il est évident qu'en faisant varier le poids P ou la longueur l, on parviendrait facilement à donner à l'instrument le degré de sensibilité le plus convenable dans chaque cas particulier.

L'appareil que j'ai fait construire avait trop d'inertie à cause du poids de la cloche, et le tube de communication de la cloche avec l'extérieur ou avec le lieu dont on voulait mesurer la pression avait un trop petit diamètre, de sorte que l'équilibre était très-long à s'établir; j'aurais pu corriger facilement ces inconvénients ; mais l'appareil à flotteur, qui avait été construit en même temps, étant plus commode et d'une sensibilité tout aussi grande, j'ai abandonné cette disposition.

M. de Vaux, ingénieur en chef des mines de Belgique, a proposé un appareil semblable à celui que je viens de décrire; seulement la cloche est équilibrée par un contre-poids, dont on détermine la valeur, pour maintenir la cloche en équilibre quand on veut mesurer la pression.

528. M. Arson a employé dans ses expériences sur l'écoulement du gaz dans les longues conduites un appareil fondé sur le même principe, cet appareil est dû à M. Brunt, fabricant de compteurs à gaz ; il se compose d'une cloche flottante (*fig.* 50). Cette cloche est équilibrée au moyen d'un réservoir complétement fermé et plein d'air placé à l'intérieur de la cloche et qui lui est concentrique; cette cloche glisse au moyen de galets sur des guides fixées à la paroi de l'enveloppe de l'appareil, cette enveloppe cylindrique contient de l'eau et se trouve en libre communication avec l'air extérieur; la capacité annulaire de la cloche est en communication, au moyen d'un tube intérieur et qui traverse l'enveloppe, avec le gaz dont on veut mesurer la pression ou la dépression.

Une crémaillère montée sur la cloche conduit une grande roue dentée dont l'axe porte une aiguille qui indique sur un premier cadran et d'une façon très-appréciable les millimètres parcourus, cette grande roue met à son tour en mouvement un pignon dont l'axe porte une seconde aiguille marquant sur un cadran, les centièmes de millimètres d'eau. Le jeu des engrenages n'affecte les indications que de quelques centièmes de millimètres d'eau.

Cet appareil porte à sa face antérieure un manomètre ordinaire en tube de gros diamètre, permettant de comparer les indications du

multiplicateur avec celles qui sont le résultat de la pression elle-même agissant sans intermédiaire.

L'idée particulièrement heureuse réalisée dans cet appareil a été

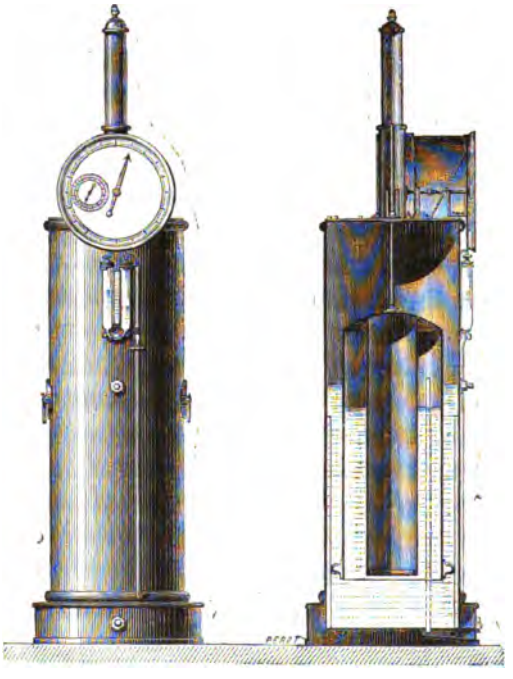


Fig. 50.

d'équilibrer la cloche au moyen du flotteur intérieur; on a ainsi évité les frottements sur les axes des contre-poids.

529. J'ai essayé une autre disposition de manomètre qui promettait une grande sensibilité, mais que, par une circonstance imprévue, j'ai été obligé d'abandonner. Considérons deux vases rectangulaires en fer-blanc, en contact par une face latérale, et communiquant par le bas au moyen de deux tubes de verres verticaux de $0^m,50$ à $0^m,80$ de longueur, réunis à leur partie inférieure par une partie courbe; supposons que la partie inférieure des tubes renferme un liquide d'une densité d, et la partie supérieure, ainsi qu'une partie des deux vases, un liquide plus léger d'une densité d', sans action sur le premier : si dans l'un des vases il y a un excès de pression p, elle sera représentée par la différence du niveau h du liquide dans les deux vases et par la différence de hauteur h' du liquide inférieur des deux

tubes de verre; ainsi, en désignant par S et s les sections des vases et des tubes, on aura évidemment :

$$p = hd + h'(d - d'); \quad \text{et} \quad h' = \frac{S}{s}h; \quad \text{d'où} \quad p = h'\left\{ d\frac{s}{S} + (d - d') \right\}.$$

En supposant S très-grand par rapport à s, on aurait simplement $p = h'(d - d')$, et l'appareil diviserait la pression réelle par $(d - d')$. J'ai employé pour le liquide inférieur du sulfure de carbone qui est très-fluide, et pour le liquide supérieur, une dissolution de sulfate de zinc qui est sans action sur le premier et dont on peut faire varier la densité de manière à la rapprocher autant qu'on veut de celle du sulfure de carbone; mais quand les densités sont peu différentes, par la moindre agitation, même quand les diamètres des tubes sont considérables, il se forme des globules de sulfure de carbone qui restent suspendus dans l'autre liquide, de sorte qu'il est impossible d'obtenir une surface de séparation bien nette des deux liquides.

530. M. Kretz a construit un manomètre différentiel fondé sur le même principe; il était formé de deux ballons en verre se terminant à la partie inférieure par des tubes verticaux qu'on réunit par un tube de caoutchouc; les deux vases contiennent, l'un de l'eau alcoolisée rougie, l'autre de l'essence de térébenthine. La surface de séparation des deux liquides se déplace quand la différence des pressions vient à changer; une variation de 1 millimètre d'eau se traduit par une marche de 25 millimètres dans l'appareil.

531. On trouve dans la *Revue universelle de M. Cuyper*, tome XVI, la description d'un manomètre dont le principe se rapproche de celui des précédents, quoique d'une plus grande simplicité. Cet appareil, dû à M. List, est formé de deux branches verticales, de $0^m,10$ de hauteur et de $0^m,015$ de diamètre, réunies par une branche horizontale de $1^m,00$ de long et de $0^m,003$ de diamètre; cet appareil contient de l'huile de pétrole, sauf sur une petite partie de la longueur du tube de communication où il y a de l'air. On règle les niveaux en ajoutant ou en enlevant du liquide, de façon que la bulle d'air soit au zéro; la longueur de cette bulle doit être plus grande que son déplacement pour qu'elle revienne exactement à son point de départ. L'une des extrémités est mise en communication au moyen d'un caoutchouc avec un tube de fer qui plonge dans la cheminée ou les canaux dont on veut mesurer le tirage. La marche de la bulle est à la marche dans les branches verticales dans le rapport inverse du carré des diamètres; cet appareil, avec les dimensions indiquées

n'amplifie les observations que dans le rapport de 12,5 à 1 ; en effet, le rapport du carré des diamètres est 25 et dans chaque branche verticale la variation n'est que la moitié de la variation totale. Il faut ajouter que même avec la précaution indiquée par l'auteur de donner une très-grande longueur à la bulle, celle-ci doit rarement revenir exactement au zéro.

532. En résumé, les appareils à tube incliné et à flotteur (526 et 528), dont l'exactitude et la grande sensibilité ont été bien constatées par l'expérience, suffisent dans tous les cas qui peuvent se présenter ; on peut même déterminer le coefficient de multiplication par comparaison avec un manomètre à eau ordinaire, sans avoir recours à l'appareil indiqué (525), qui n'est réellement nécessaire que pour des mesures exigeant une très-grande précision.

LIVRE III

DES CHEMINÉES.

533. Les appareils de chauffage varient de forme et de dispositions avec la nature de l'effet à produire, mais, en général, ils se composent tous de trois parties distinctes : le foyer, le lieu où la chaleur est utilisée et la cheminée.

534. Les cheminées remplissent deux fonctions :

1° Elles rejettent à de grandes hauteurs, dans l'atmosphère, l'air brûlé chargé souvent de fumée, qui serait incommode et même nuisible s'il se dégageait à une petite hauteur ;

2° Elles appellent dans le foyer l'air nécessaire à la combustion.

CHAPITRE PREMIER

Mouvement de l'air chaud dans les tuyaux verticaux.

535. Lorsqu'une masse d'air est à une température supérieure à celle de l'air environnant, elle tend à s'élever en vertu d'une force égale à l'excès du poids de l'air déplacé sur le sien propre. C'est un cas particulier du principe d'Archimède.

Il en est de même quand l'air chaud se trouve dans un tuyau vertical AB (*fig.* 51), ouvert par les deux bouts. En effet, représentons par P la pression de l'atmosphère en kilogrammes à la hauteur du point A, sur une surface égale à la section du tuyau ; par p et p', le poids de deux colonnes d'air, ayant le volume du tuyau sous la pression atmosphérique, l'une à la température de l'air extérieur, l'autre à celle de l'air chaud. Il est évident que la pression exercée au point B de bas en haut sera $P + p$, et que la pression exercée, au même point, en sens contraire, sera $P + p'$; ainsi la colonne d'air chaud tendra à s'élever en vertu de la pression $p - p'$. Il résulte de là que, si le tuyau AB était adapté par le bas à un tuyau horizontal

BC, chauffé extérieurement par un foyer (*fig.* 52), l'air extérieur entrerait constamment par l'orifice C et s'échapperait échauffé par l'orifice A. Cet écoulement aurait lieu en vertu de l'excès de la pression atmosphérique au point C sur la pression intérieure au bas du tuyau AB.

536. Pour obtenir la vitesse d'accès de l'air extérieur au point C,

Fig. 51.

Fig. 52.

en supposant la section du canal constante, rappelons-nous que la vitesse d'écoulement d'un liquide ou d'un gaz, abstraction faite des résistances qui dépendent de la forme et des dimensions du canal, est donnée (307) par la formule

$$v = \sqrt{2gP}$$

dans laquelle P représente la hauteur d'une colonne de fluide soumis à la pression, et qui ferait équilibre à cette pression, de quelque manière qu'elle soit produite. Dans le cas dont il s'agit, P est évidemment la hauteur d'une colonne d'air, et il est facile d'en trouver la valeur.

Désignons par H la hauteur de la cheminée à partir du centre de la section C (*fig.* 52), par θ la température extérieure, par t celle de l'air de la cheminée, et par M la pression atmosphérique au point A.

en colonne d'eau. La pression au point C, de dehors en dedans, mesurée en colonne d'eau, sera :

$$M + Hd$$

en appelant d la densité de l'air à 0°; et la pression de dedans en dehors sera :

$$M + Hd'$$

d' étant la densité de l'air à $t°$.

La différence de pression représentant la charge que détermine l'écoulement sera donc

$$P = H(d - d')$$

et comme

$$d = \frac{d_0}{1 + a\theta} \quad \text{et} \quad d' = \frac{d_0}{1 + at}$$

on aura :

$$P = \frac{Ha(t - \theta)\, d_0}{(1+at)(1+a\theta)}.$$

537. Il est utile de remarquer que la pression à toutes les hauteurs de la colonne d'air chaud est égale à celle que nous avons trouvée au point C. En effet, considérons une section horizontale de la cheminée à une distance H' de son sommet; la pression de bas en haut sera $M + H' d'$, la pression de haut en bas sera $M + H d - (H - H') d'$, et la différence sera encore $H d - H' d'$.

538. Si on exprime cette pression en colonne d'air à 0°, on aura, en appelant x la hauteur de cette colonne :

$$xd = x \cdot \frac{d_0}{1 + a\theta} = \frac{Ha(t - \theta)d_0}{(1 + at)(1 + a\theta)},$$

d'où :

$$x = \frac{Ha(t - \theta)}{1 + at}.$$

Si au lieu d'exprimer la pression en colonne d'air à la température θ, on l'exprime en colonne d'air à la température t, elle sera représentée par :

$$\frac{Ha(t - \theta)}{1 + a\theta}.$$

En considérant l'écoulement de l'air froid qui entre dans la che-

minée, supposé soumis à la différence de pression $\frac{Ha(t-\theta)}{1+at}$, la vitesse pour l'air froid entrant dans la cheminée sera :

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t-\theta)}{1+at}} \ldots\ldots\ldots$$

En supposant l'air chaud qui sort de la cheminée soumis à la différence de pression $\frac{Ha(t-\theta)}{1+a\theta}$, la vitesse de sortie sera :

$$v' = \sqrt{\frac{2gHa(t-\theta)}{1+a\theta}}.$$

Il est facile de constater que ces deux vitesses sont incompatibles, en effet on a :

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{\frac{1+a\theta}{1+at}},$$

tandis que si l'on considère les volumes écoulés que nous représenterons par V et V', on doit avoir :

$$\frac{v}{v'} = \frac{V}{V'} = \frac{1+a\theta}{1+at}.$$

Entre les deux formules, il est permis d'hésiter, et cependant il faut choisir. Péclet dans sa dernière édition avait accepté la première en se fondant sur quelques expériences, d'ailleurs incomplètes, et qui ne semblent pas suffisantes pour décider absolument la question.

539. La théorie mécanique de la chaleur nous permettra de lever la difficulté.

Supposons qu'au bas de la cheminée la pression atmosphérique, exprimée en kilogrammes par mètre carré, soit p, et que θ soit la température de l'air extérieur, et que, d'autre part, p soit la pression atmosphérique au sommet de la cheminée et t la température de l'air qui s'écoule.

Si nous considérons une tranche infiniment mince de l'air renfermé dans la cheminée, dh sera la hauteur de cette tranche, dt sera l'accroissement de température subi par l'air par son passage à travers la tranche ; si nous supposons qu'il n'y a pas de refroidissement par les parois de la cheminée : en appelant u la vitesse, l'accroissement de puissance vive extérieure de l'unité de poids d'air traversant l'unité de section de la cheminée sera $\frac{udu}{g}$ l'équiva-

lent en travail de la chaleur disparue sera $\frac{dQ}{A}$ et le travail de la pesanteur sera dh; l'équation des forces vives sera donc

$$\frac{udu}{g} = \frac{dQ}{A} - DH \ldots\ldots\ldots (1)$$

D'un autre côté, si nous considérons l'air entrant dans la cheminée à la température θ et à la pression p^0, il aura dû, sous l'influence du foyer, s'échauffer sous la pression constante p jusqu'à une température t, telle qu'en se détendant ensuite sans perte ni gain de chaleur il aura dû se trouver à la sortie de la cheminée à la température t et à la pression p de telle façon qu'on aura :

$$\frac{1 + at}{1 + at'} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

ou en posant $\frac{k-1}{k} = n$

$$\frac{1 + at'}{1 + at} = \frac{p_0^n}{p^n}$$

et enfin :

$$t' - t = \frac{1 + at}{a} \cdot \frac{p_0^n - p^n}{p_n}.$$

L'expression (1), étant intégrée, nous donnera pour vitesse de sortie de l'air

$$\frac{u^2}{2g} = \int_t^{t'} \frac{dQ}{A} - H$$

H étant la hauteur de la cheminée;
d'où :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{C}{A}(t' - t) - H,$$

et par suite :

$$\frac{u^2}{2q} = \frac{C}{A} \cdot \frac{1 + at}{a} \cdot \frac{p_0^n - p^n}{p_n} - H,$$

si D représente en kilogrammes le poids moyen du mètre cube de l'air extérieur pour la hauteur de la cheminée, on aura :

$$p_0 = p + HD,$$

et si l'on pose :

$$p = m\mathrm{HD}$$

on aura

$$p_0 = (1+m)\,\mathrm{HD} = m\left(1+\frac{1}{m}\right)\mathrm{HD}$$

d'où

$$p_0^n = m^n\left(1 + n\cdot\frac{1}{m} + n(n-1)\frac{1}{m^2} + \ldots\ldots\right)\mathrm{H}^n\mathrm{D}^n$$

et comme m peut être considéré comme très-grand, on aura :

$$p_0^n = m^n.\,\mathrm{H}^n\mathrm{D}^n.\left(1+\frac{n}{m}\right),$$

d'où

$$\frac{p_0^n - p^n}{p^n} = \frac{n}{m}.$$

En remplaçant dans la valeur de u, il vient

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{Cn}{A}\cdot\frac{1+at}{am} - \mathrm{H},$$

mais on a

$$m = \frac{p}{\mathrm{HD}}, \quad \frac{Cn}{A} = \frac{0{,}76\times 13{,}6a}{1{,}293},$$

et si l'on admet :

$$\mathrm{D} = \frac{1{,}293\,.\,(p+p_0)}{2(1+a\theta)\,.\,0{,}76\,.\,13{,}6}$$

il vient en remplaçant :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{p+p_0}{2p}\,.\,\mathrm{H}\,\frac{(1+at)}{1+a\theta} - \mathrm{H};$$

or on peut sans erreur sensible admettre

$$\frac{p+p_0}{2p} = 1,$$

d'où :

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{\mathrm{H}a(t-\theta)}{1+a\theta}.$$

C'est donc cette dernière formule qui nous servira dorénavant.

540. Cette formule étant admise, il en résultera pour l'écoulement de l'air froid la valeur

$$v = \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha t}\sqrt{\frac{2gHa\,(t - \theta)}{1 + a\theta}}$$

ou,

$$v = \frac{0{,}268}{1 + \alpha t}\sqrt{H(t - \theta)\,(1 + a\theta)} \quad \ldots\ldots\ldots \text{(A)}$$

la vitesse de l'air chaud étant

$$v' = 0{,}268\sqrt{\frac{H(t - \theta)}{1 + a\theta}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(B)}$$

Nous avons supposé, dans ce que nous venons de dire, que la densité de l'air ne dépendait pas de sa pression ; il n'en est pas tout à fait ainsi, parce que la densité de l'air, à la même température, diminue à mesure qu'il s'élève ; mais il est facile de reconnaître que, pour les plus hautes cheminées, les variations de densités résultant des variations de hauteur sont insensibles. En effet, pour la hauteur $0^m,76$ du baromètre, la pression atmosphérique est représentée par une colonne d'eau de $0^m,76.\ 13,6 = 10^m,336$, et par une colonne d'air à 0°, sous la même pression, égale à $10^m,336 : 0,0013 = 7950$ m. ; ainsi, la densité de l'air à une hauteur de 20 mètres, par exemple, serait à celle de l'air à la surface du sol sensiblement dans le rapport de 7930 à 7950, c'est-à-dire dans celui de 1 à 1,0025, variation complétement négligeable.

541. Nous avons supposé le tuyau vertical cylindrique et complétement ouvert à ses extrémités ; mais il est facile de voir que la position et la forme du canal sont sans influence sur la charge qui produit l'accès de l'air extérieur, quand la température dans le canal est partout égale à t, H représentant la différence de niveau des deux extrémités du canal d'air chaud. Si l'air, dans le canal ascendant, éprouvait des variations de température, il faudrait évidemment prendre pour t la température moyenne.

542. La formule (A) donne la vitesse d'accès de l'air extérieur, abstraction faite de toute espèce de résistance ; mais il y a toujours des pertes de charge provenant du frottement et de la forme du canal. Si la cheminée, au lieu d'être cylindrique, avait des changements de direction et de section, la charge qui produirait l'accès de l'air froid serait toujours la même ; mais la vitesse réelle d'accès s'obtiendrait en tenant compte de toutes les résistances, au moyen

de la formule générale indiquée (466). Nous reviendrons plus tard sur cette question.

543. Pour reconnaître comment la vitesse d'accès V de l'air extérieur varie à mesure que t augmente, d'après la formule (A), supposons $\theta = 0$; cette formule devient

$$v = \sqrt{2gH} \cdot \sqrt{\frac{at}{(1+at)^2}}.$$

En calculant sa valeur pour des valeurs de t égales à

50° 100° 150° 200° 250° 300° 350° 400° 450° 500°,

on trouve pour valeur du second facteur du deuxième membre :

0,36 0,44 0,47 0,49 0,496 0,496 0,492 0,487 0,482 0,475.

On voit que, quand t augmente, la valeur de ce facteur va d'abord en augmentant pour diminuer ensuite; c'est qu'en effet cette valeur et par suite celle de v présente un maximum que le calcul permet de déterminer et qui est obtenu par $t = 273°$. Si θ n'était pas égal à zéro, ce maximum se produirait pour $t = 273° + 2\theta$.

On voit donc qu'il n'est pas toujours utile au point de vue du tirage d'augmenter la température du gaz de la cheminée, cela devient même nuisible à partir de la température $273 + 2\theta$, puisqu'au delà, toute augmentation de température répond à une diminution de vitesse de l'air froid; au point de vue de la véritable utilisation de la chaleur dépensée pour le tirage, il sera même utile de se tenir au-dessous de cette température, car, dans le voisinage du maximum, le tirage ne subit qu'une très-faible variation, pour une variation notable de la température.

544. Si nous comparons les résultats déduits de la formule (A) avec ceux qu'on obtiendrait en employant la formule qui suppose la charge de l'écoulement exprimée en air froid, nous aurons, en faisant $\theta = o$ dans cette formule :

$$v = \sqrt{2gH} \sqrt{\frac{at}{1+at}};$$

et si l'on fait successivement t égal à

50° 100° 150° 200° 250° 300° 350° 400° 500° 1000° 1500° 2000°

on trouve, pour les valeurs du second facteur,

0,39 0,51 0,57 0,64 0,68 0,71 0,74 0,76 0,80 0,88 0,91 0,93.

On voit que jusqu'à 100° les résultats tirés des deux formules diffèrent peu et que pour la température de 300°, qui n'est guère dépassée dans la pratique, les valeurs obtenues sont sensiblement dans le rapport de 7 à 5.

Nous devons dire qu'au point de vue de la pratique ces différences importent peu ; nous verrons en effet qu'on est arrivé pour déterminer les dimensions des cheminées à des données purement empiriques qui suffisent dans tous les cas.

Ce qu'il faut surtout retenir de ces formules, et ce résultat est indiqué aussi bien par l'une que par l'autre, c'est que, toutes choses égales d'ailleurs, le tirage varie proportionnellement à *la racine carrée de la hauteur de la cheminée*, et non pas proportionnellement à la hauteur comme certaines personnes sont tentées de le supposer.

545. Nous avons supposé que l'air pénétrant dans le canal vertical n'éprouvait, en s'échauffant, que la variation de densité qui résultait du changement de température ; mais ordinairement l'échauffement résulte de la combustion, la nature du gaz est changée, et il est nécessaire d'examiner ce que deviennent les formules (A) et (B) (540), quand la densité tabulaire du gaz est quelconque et égale à δ, au lieu d'être égale à l'unité.

Dans ce cas, les valeurs (A) et (B) ne subiraient d'autre changement que l'introduction du facteur δ en dénominateur sous le radical, et par suite, si nous désignons par V la vitesse et par V_1 celle qu'aurait prise l'air dans les mêmes conditions de température et de hauteur de la cheminée, on aura

$$\frac{v}{V_1} = \sqrt{\frac{1}{\delta}}.$$

Si, par exemple, la totalité de l'oxygène était transformée en acide carbonique, la densité de ce dernier gaz étant 1,529, et celle de l'azote 0,976, celle du mélange sera $0{,}21 \cdot 1{,}529 + 0{,}79 \cdot 0.976 = 1{,}091$; si la moitié seulement de l'oxygène était transformée en acide carbonique, ce qui arrive ordinairement, la densité serait seulement 1,04. On aura pour les valeurs de $\frac{V}{V_1}$ dans les deux cas les deux nombres : 1,04 et 1,02.

On voit que les variations de la vitesse sont insignifiantes, d'autant plus que, dans le cas des combustibles ordinaires, il y a toujours formation, pendant la combustion, d'une certaine quantité de vapeur d'eau dont la densité par rapport à l'air est 0,621 seulement, et dont la présence diminue l'effet de l'acide carbonique. Ainsi on peut admettre, comme une approximation bien suffisante dans la pratique, que l'effet produit par une colonne du mélange d'air et de gaz résultant de la combustion est le même que si la colonne était formée d'air pur.

546. *Mouvement de l'air chaud dans un canal formé de plusieurs tuyaux verticaux parcourus successivement.* — Si l'air chaud parcourait successivement, en montant et descendant, plusieurs tuyaux verticaux dans lesquels il n'aurait pas la même température, la charge, à l'origine du canal, dépendrait à la fois des hauteurs des tuyaux, et des températures de l'air chaud. Nous allons nous occuper de la déterminer d'une façon générale.

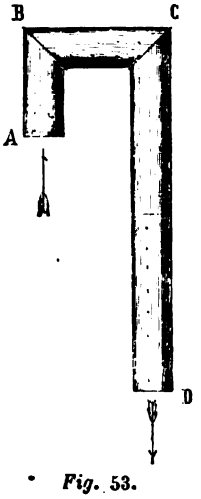


Fig. 53.

Considérons d'abord une cheminée AB (*fig.* 53) qui se prolonge horizontalement suivant BC, et redescend verticalement suivant CD, de manière que le canal ait la forme d'un siphon. Représentons par t et t_1 les températures de l'air dans les tuyaux AB et CD, par θ celle de l'air extérieur, par p la pression de l'atmosphère en A, par p_1 la même pression en D ; soient de plus d, d_1 et d' les poids du mètre cube d'air aux températures t, t_1 et θ ; la pression intérieure sera D en

$$p_0 - \mathrm{H}d + \mathrm{H}_1 d_1$$

la pression extérieure étant p_1, la différence de pression à l'orifice d'écoulement D sera

$$p_0 - \mathrm{H}d + \mathrm{H}_1 d_1 - p_1$$

et comme

$$p_1 - p_0 = (\mathrm{H}_1 - \mathrm{H})d',$$

on aura pour la valeur de la pression motrice exprimée en kilogrammes par mètre carré

$$-\mathrm{H}d + \mathrm{H}_1 d_1 - (\mathrm{H}_1 - \mathrm{H})d' = \mathrm{H}(d' - d) - \mathrm{H}_1(d' - d_1)$$

et cette pression exprimée en gaz à la pression d_1 sera :

$$H\frac{(d'-d)}{d_1} - H_1\frac{(d'-d_1)}{d_1};$$

or

$$\frac{d}{d_1} = \frac{1+at_1}{1+at}, \qquad \frac{d'}{d} = \frac{1+at}{1+a\theta}, \qquad \frac{d'}{d_1} = \frac{1+at_1}{1+a\theta},$$

d'où :

$$\frac{d'-d}{d_1} = \frac{a(t-\theta)(1+at_1)}{(1+a\theta)(1+at)} \quad \text{et} \quad \frac{d'-d_1}{d_1} = \frac{a(t_1-\theta)}{1+a\theta}.$$

La pression motrice sera donc

$$P = \frac{Ha(t-\theta)(1+at_1) - H_1a(t_1-\theta)(1+at)}{(1+a\theta)(1+at)}.$$

547. Supposons une troisième colonne EF (*fig.* 54), dont nous désignerons la hauteur par H_2; appelons t_2, la température de l'air dans cette colonne, et d_2 sa densité ; enfin désignons par p_2, la pression de l'atmosphère à l'orifice d'écoulement.

La pression intérieure à l'orifice d'écoulement sera :

$$p_0 - Hd + H_1d_1 - H_2d_2$$

et la pression motrice aura pour valeur

$$p_0 - Hd + H_1d_1 - H_2d_2 - p_1,$$

et comme

$$p_1 - p_0 = [H_1 - (H + H_2)]d',$$

il viendra :

$$H(d'-d) - H_1(d'-d_1) + H_2(d'-d_2)$$

et cette pression exprimée en colonne de gaz de densité d_2 sera :

$$H\cdot\frac{d'-d}{d_2} - H_1\cdot\frac{d'-d_1}{d_2} + H_2\cdot\frac{d'-d_2}{d_2},$$

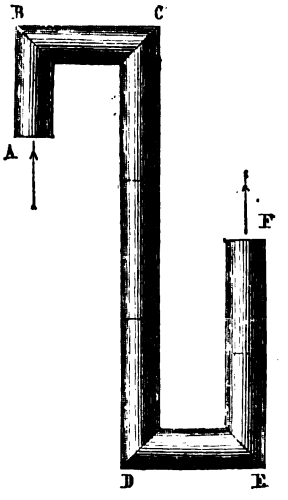


Fig. 54.

et comme

$$d'(1+a\theta) = d(1+at) = d_1(1+at_1) = d_2(1+at_2),$$

il viendra pour valeur de la pression motrice :

$$P = \frac{a}{(1+a\theta)(1+at)(1+at_1)} \begin{bmatrix} H(t-\theta)(1+at_2)(1+at_1) \\ -H_1(t_1-\theta)(1+at)(1+at_2) \\ +H_2(t_2-\theta)(1+at)(1+at_1) \end{bmatrix}$$

548. Supposons maintenant que le canal ait la forme d'un siphon renversé ABCD (*fig.* 55).

En appelant H la hauteur de la colonne AB ; H_1, la hauteur de CD

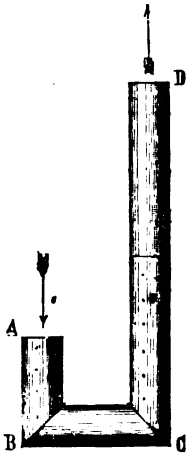


Fig. 55.

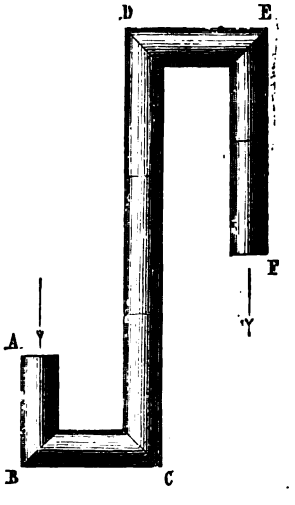


Fig. 56.

et conservant les mêmes notations que dans les cas précédents ; on trouvera pour valeur de la pression motrice

$$p_0 + Hd - H_1 d_1 - p_1,$$

et comme

$$p_0 - p_1 = (H_1 - H)d',$$

il viendra :

$$H(d - d') - H_1(d - d'),$$

et si l'on exprime la pression motrice en colonne de gaz à la température t_1 il viendra :

$$P = H.\ \frac{d-d'}{d_1} - H_1\ \frac{d_1 - d}{d_1},$$

d'où en faisant les mêmes transformations que précédemment :

$$P = \frac{H_1 a(t_1 - \theta)(1 + at) - Ha(t - \theta)(1 + at_1)}{(1 + a\theta)(1 + at)}.$$

Considérons enfin un canal formé de trois tuyaux disposés comme dans la figure 56 ; en conservant toujours les mêmes notations, on aura :

$$p = p_0 + Hd - H_1 d_1 + H_2 d_2 - P_1,$$

et comme on a :

$$p_1 - p_0 = (H_1 - H - H_2)d',$$

il viendra pour la valeur de la charge exprimée en gaz à la température t_2

$$P = H\frac{(d - d')}{d_2} - H_1\frac{(d_1 - d')}{d_2} + H_2\frac{(d_2 - d')}{d_2},$$

et par suite :

$$P = \frac{a}{1 + a\theta(1 + at)(1 + at_1)}\begin{bmatrix} - H(t - \theta)(1 + at_2)(1 + at_1) \\ + H_1(t_1 - \theta)(1 + at)(1 + at_2) \\ - H_2(t_2 - \theta)(1 + at)(1 + at_1) \end{bmatrix}.$$

549. Dans tous les cas que nous venons de considérer, la vitesse dans le canal, en supposant l'absence de résistance, serait pour l'air chaud à l'orifice de sortie :

$$v' = \sqrt{2gP}$$

et la vitesse de l'air froid serait :

$$v = \frac{1 + a\theta}{1 + at}\sqrt{2gP}.$$

Si la température était la même dans tous les conduits, les formules précédentes prendraient une forme beaucoup plus simple : on pourrait alors représenter la charge à l'orifice, quel que fût le nombre de tuyaux verticaux se succédant, par la formule générale :

$$P = \frac{a(t + \theta)}{1 + a\theta} \cdot \Sigma H,$$

formule dans laquelle Σ H représente la somme algébrique des hauteurs de toutes les branches verticales en comptant comme positives celles dans lesquelles l'air monte, et comme négatives celles dans lesquelles il descend.

550. Il est important de remarquer, que dans le cas où le gaz chaud commence par descendre, en supposant que l'expression de la charge soit positive, le mouvement ne se produirait qu'autant qu'on aurait amorcé le système des siphons, en échauffant quelques-unes des branches dans lesquelles l'air marche de bas en haut. Il est évident que cette précaution ne serait pas nécessaire dans le cas où l'air chaud monterait dans la première colonne.

551. *Mouvement de l'air chaud dans un canal formé, sur une certaine longueur, de plusieurs tuyaux verticaux parcourus simultanément.* — Considérons d'abord un canal vertical (*fig.* 57), composé, sur une certaine hauteur, de deux branches parallèles égales. Si toutes deux renferment de l'air à la même température, tout étant égal dans les deux branches, l'air chaud ascendant les parcourra avec la même vitesse; mais pour peu qu'il y ait de différence dans les diamètres, la résistance ou les causes de refroidissement, cette égalité de vitesse n'existera pas; et, si la section de chacun d'eux

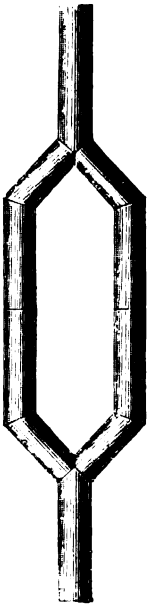


Fig. 57.

Fig. 58.

Fig. 59.

est égale à la section des tuyaux extrêmes, le mouvement ne s'établira que dans un seul, celui qui présentera le moins de résistance. Ce phénomène aura évidemment lieu, quel que soit le nombre des tuyaux.

552. Si le canal était seulement rélargi sur une portion de la longueur (*fig.* 58), le courant d'air chaud ne remplirait pas nécessairement le rélargissement du tuyau ; s'il le remplissait à l'origine, le refroidissement des parois établirait bientôt un décroissement de température du centre à la circonférence ; il se produirait dans les veines élémentaires, et dans un même sens, des variations de vitesse qui iraient en augmentant, de sorte que la veine d'air chaud traverserait bientôt l'espace rélargi, en augmentant peu de section.

553. Supposons maintenant que l'air chaud, appelé par une cheminée, descende dans un canal formé de deux branches parallèles (*fig.* 59). Dans ce cas, l'air chaud se répartira également dans les deux branches, et l'égalité de vitesse s'y maintiendra, malgré les inégalités de refroidissement que l'air pourra éprouver. En effet, dans chaque branche, la charge qui produit le mouvement est égale à la différence des pressions dans la cheminée qui produit l'appel et dans le canal considéré, en les supposant isolés ; et, par conséquent, si dans l'une des branches le refroidissement était plus grand que dans l'autre, la vitesse tendrait à y devenir plus grande. La même chose aurait lieu dans le cas d'un nombre quelconque de tuyaux parallèles.

554. Si le canal par lequel descend l'air chaud était rélargi (*fig.* 60), les veines élémentaires, dans le rélargissement, prendraient et conserveraient la même cause que dans le cas précédent

Ces faits bien constatés par l'expérience sont d'une grande importance dans la construction des appareils de chauffage, comme nous le verrons par la suite.

Fig. 60.

555. Observons que dans tout ce qui vient d'être dit relativement à la valeur de la vitesse des gaz dans les cheminées, nous avons fait abstraction des résistances que l'air éprouve dans son mouvement. Mais, comme ces résistances sont rarement négligeables, il en résulte toujours des réductions de vitesses plus ou moins grandes. Quand le canal de descente est unique, le frottement se manifeste contre la surface ; ainsi, par ce seul motif, la vitesse y serait plus petite que dans les autres points de la section ; mais le refroidissement que l'air chaud y éprouve tend à diminuer la différence de vitesse qui se produirait naturellement dans les veines, et cette

différence sera encore diminuée par la transmission, de proche en proche, de la résistance et de la température. Si le canal de descente était formé de plusieurs tuyaux de même section et de même longueur, tout se passerait de la même manière dans chacun d'eux, et l'air chaud y prendrait la même vitesse. Mais, si les tuyaux ont des sections différentes, la vitesse sera modifiée par le refroidissement qui tend à l'augmenter et par le frottement qui tend à la diminuer. Le frottement varie proportionnellement au carré de la vitesse, tandis que le refroidissement est proportionnel au diamètre et dépend aussi de la vitesse; il est par conséquent assez difficile de prévoir et de calculer d'une manière générale ce qui arrivera. Toutefois, le refroidissement est en général assez faible, et l'influence du frottement l'emportera presque toujours; la vitesse réelle sera donc d'autant moindre que les tuyaux auront un plus petit diamètre, ce qui s'accorde d'ailleurs parfaitement avec l'expérience. Les différences de vitesses seront évidemment d'autant plus petites que les vitesses elles-mêmes seront plus faibles.

CHAPITRE II

Considérations générales sur les cheminées d'usine.

556. Afin de pouvoir étudier d'une manière complète les phénomènes qui se produisent dans les cheminées, il est nécessaire d'avoir une idée de la disposition générale des fourneaux. Comme nous l'avons déjà dit, les fourneaux sont composés du foyer, de l'espace où la chaleur est utilisée, et de la cheminée.

Les foyers sont ordinairement formés de barreaux de fonte placés dans un plan horizontal ou un peu incliné, séparés les uns des autres par de petits intervalles, et sur lesquels on place le combustible; au-dessous se trouve un espace communiquant librement avec l'air et qu'on désigne sous le nom de cendrier.

L'espace compris entre le foyer et la cheminée, et où une partie de la chaleur produite passe dans le corps qu'on veut échauffer, a des formes et des dimensions qui varient avec la nature de l'effet à produire.

Les cheminées sont toujours des canaux verticaux, en briques ou en tôle, destinés, comme nous l'avons vu, à évacuer l'air brûlé et surtout à appeler l'air nécessaire à la combustion.

557. L'appel d'air extérieur provenant de la température de l'air brûlé et de la hauteur de la cheminée porte le nom de *tirage*. Le tirage d'une cheminée, tel que nous l'avons calculé, est toujours en réalité diminué, dans une très-grande proportion, par la résistance de la grille, les changements brusques ou continus de section et de direction et par les frottements.

Les phénomènes qui se produisent dans les fourneaux sont très-compliqués et très-variables, principalement avec l'état du foyer; mais on peut cependant reconnaître l'influence des différentes circonstances qui modifient le tirage. Nous supposerons d'abord que le circuit a partout la même section, depuis l'ouverture du cendrier jusqu'au sommet de la cheminée ; cette hypothèse s'éloigne peu de ce qui se pratique ordinairement ; on donne même à la somme des orifices libres de la grille une surface peu différente de la section horizontale de la cheminée. D'après cela, en désignant par S la section du canal qui amène l'air sous la grille, par v la vitesse d'accès de l'air froid, Sv représentera le volume d'air froid appelé par seconde. Représentons par G la résistance de la grille, par C celle du circuit qui précède la cheminée, ces deux résistances étant rapportées à la charge correspondante à la vitesse d'accès de l'air froid, enfin par H et D la hauteur et le diamètre de la cheminée. Le frottement dans la cheminée sera $\frac{KH}{D}$ et serait exactement le même si la cheminée avait pour section le carré circonscrit au cercle. En appliquant ici les lois relatives aux mouvements des gaz comprimés, nous aurons, en supposant la température extérieure égale à 0° :

$$P - p = G + C + \frac{KH}{D}$$

et par suite, t étant la température dans la cheminée :

$$v = \frac{0{,}268}{1 + at}\sqrt{\frac{Ht}{1 + G + C + \frac{KH}{D}}}.$$

558. L'examen de cette formule conduit à plusieurs conséquences d'une grande importance dans la pratique.

1° Quand les valeurs de G et de C sont très-grandes relativement au frottement dans la cheminée, ce qui a presque toujours lieu, le tirage est sensiblement proportionnel à la racine carrée de la hauteur.

2° Si l'on supposait G et C nuls, ce qui n'arriverait que dans le cas où le foyer serait placé au bas de la cheminée, où la grille n'occuperait qu'une très-petite partie de la section, et où l'air n'éprouverait aucune espèce de résistance pour pénétrer dans la cheminée, le tirage varierait très-peu avec la hauteur de la cheminée; il en serait presque indépendant lorsque KH : D serait très-grand relativement à 1. Ce sont des circonstances qui ne se rencontrent que rarement dans les applications.

Supposons enfin que rien n'étant changé dans les dimensions de l'appareil, la température t varie. En supposant G et C constants, le frottement dans la cheminée étant en général très-petit relativement à G + C, le tirage variera à peu près proportionnellement à $\frac{\sqrt{t}}{1+at}$, c'est-à-dire dans le même rapport que le tirage théorique; ainsi, dans la supposition que nous avons faite, le rapport du tirage réel au tirage théorique serait un nombre constant, qui ne dépendrait que des dimensions de l'appareil. Mais, dans un appareil fonctionnant, t ne peut augmenter que par l'accroissement de la vitesse du courant, et cet accroissement ne peut avoir lieu que par une diminution des résistances, qui, dans la supposition admise, ne peut provenir que de l'état du foyer ou de l'élévation du registre; le tirage augmente alors dans un plus grand rapport que dans la supposition de G et C constants; de même la valeur de t ne pourrait diminuer que par l'accroissement de résistance de la grille ou par l'abaissement du registre, et la diminution de tirage serait alors plus rapide que si les résistances ne variaient pas.

559. Examinons maintenant ce qui arriverait, si le circuit était interrompu par un diaphragme. C'est une circonstance qui se présente dans tous les appareils de chauffage, car tous sont pourvus de registres destinés à régulariser le tirage ou à le supprimer pendant les interruptions de travail. Nous supposerons d'abord que le diaphragme soit placé dans le canal qui amène l'air extérieur sous la grille.

En désignant par d le diamètre de l'orifice du diaphragme, nous aurons :

$$P - p = \left[G + C + \frac{KH}{D} + \left(\frac{D^4}{d^4} - 1\right)\frac{1}{(1+at)^2}\right]p$$

d'où

$$v = \frac{0{,}268}{1+at}\sqrt{\frac{Ht}{1 + G + C + \frac{KH}{D} + \left(\frac{D^4}{d^4} - 1\right)\frac{1}{(1+at)^2}}}$$

en négligeant la perte de charge à l'entrée de l'orifice et la charge gagnée à la sortie, qui l'une et l'autre sont toujours très-petites relativement au dénominateur du second radical de la valeur de v.

Il résulte de cette formule que l'influence du diaphragme est d'autant plus petite que la résistance totale du circuit est plus considérable. Dans les grands générateurs à vapeur, la vitesse réelle d'accès est inférieure à un cinquième de la vitesse théorique. En la supposant égale à cette fraction, on aura à peu près :

$$v = \frac{0{,}268}{1+at}\sqrt{Ht}\sqrt{\frac{1}{25+\left(\frac{D^4}{d^4}-1\right)\frac{1}{(1+at)^2}}}.$$

Si l'on suppose $t = 273°$ et si l'on prend successivement pour valeurs du rapport $\frac{D^2}{d^2}$ des sections de la cheminée et de l'orifice, les nombres suivants :

2 4 6 8 10 20 40 60 80 100,

les valeurs du second radical seront :

0,196 0,175 0,172 0,152 0,142 0,090 0,048 0,032 0,024 0,020.

La valeur du radical, sans le diaphragme, est égale à 0,20, et, par l'influence du diaphragme, elle est réduite dans le rapport

0,98 0,875 0,86 0,76 0,71 0,45 0,24 0,16 0,12 0,10.

Ainsi, comme il était facile de le prévoir à l'inspection de la formule, les diaphragmes diminuent le tirage dans une proportion beaucoup plus petite que le rapport des sections ; un diaphragme qui réduit la section à un dixième réduit seulement le tirage aux deux tiers. Cette faible influence des diaphragmes résulte de ce qu'ils diminuent en même temps la vitesse, et par suite la résistance dans le reste du circuit.

560. Le diaphragme réduisant la vitesse d'appel dans une moindre proportion que le rapport de sa section à celle du canal, il s'ensuit que la vitesse de l'air dans l'orifice du diaphragme doit augmenter à mesure que sa surface diminue. Dans le cas général, la vitesse de l'air dans le diaphragme est

$$v' = \frac{0{,}268}{1+at}\cdot\frac{D^2}{d^2}\sqrt{\frac{Ht}{1+G+C+\frac{KH}{D}+\left(\frac{D^4}{d^4}-1\right)\frac{1}{(1+at)^2}}},$$

et dans le cas particulier que nous avons examiné, on a :

$$v' = \frac{0{,}268}{1+at}\sqrt{Ht}\sqrt{\frac{\frac{D^4}{d^4}}{25+\left(\frac{D^4}{d^4}-1\right)\frac{1}{(1+at)^2}}};$$

en prenant pour le rapport des sections $D^2 : d^2$ les mêmes nombres que précédemment, on trouve pour les valeurs du second radical :

0,392 0,700 1,032 1,216 1,420 1,800 1,920 1,920 1,92 2,00 ;

et comme la valeur de ce radical sans le diaphragme est égale à 0,20, le rapport de la vitesse dans le diaphragme à la vitesse dans le circuit sans le diaphragme sera :

1,96 3,50 5,16 6,08 7,10 9,00 9,60 9,60 9,60 10,00.

Ainsi ce rapport s'approche toujours davantage de 10 à mesure que le diamètre du diaphragme diminue ; on comprend en effet que pour une valeur de plus en plus grande du rapport $\frac{D^4}{d^4}$, la vitesse dans le canal va en diminuant de plus en plus et, avec elle, les frottements.

Il résulte aussi de cette valeur que prend la vitesse v' une autre conséquence remarquable, c'est que lorsque le rapport $\frac{D^4}{d^4}$ augmente indifféremment, le maximum de tirage tend à disparaître ; en effet v' tend alors vers une limite qui est

$$0{,}268\sqrt{Ht}.$$

On voit qu'alors le tirage est sensiblement proportionnel à la racine carrée de l'excès de la température de la cheminée sur celle de l'air ambiant ; on peut d'ailleurs dire que ce résultat se produira toutes les fois qu'il y aura des résistances considérables au passage de l'air avant le foyer.

561. S'il y avait dans le canal qui amène l'air au cendrier plusieurs diaphragmes assez espacés pour que la veine d'air, après avoir traversé chacun d'eux, remplît le tuyau dans lequel ils sont placés avant de rencontrer le suivant, la vitesse deviendrait, en appelant m le nombre des diaphragmes, et en rappelant cette vitesse à la section du canal

$$v' = \frac{0{,}268}{1+at}\sqrt{\frac{Ht}{1+G+C+\frac{KH}{D}+m\left(\frac{D^4}{d^4}-1\right)\frac{1}{(1+at,^2}}}.$$

On voit que pour les grandes valeurs de $\frac{D^4}{d^4}$ la valeur de la vitesse varierait sensiblement en raison inverse de la valeur de m. Dans ce cas, comme dans le précédent, pour une grande valeur de $\frac{D^4}{d^4}$, la vitesse sera proportionnelle à la racine carrée de l'excès de la température de la cheminée sur celle du milieu ambiant.

562. Nous avons supposé que les diaphragmes étaient placés dans le canal d'air froid qui précède la grille; supposons maintenant qu'ils soient placés dans la partie du circuit parcourue par l'air chaud. On aura :

$$v' = \frac{0{,}268}{1+at}\sqrt{\frac{Ht}{1+G+C+\frac{KH}{D}+m\left(\frac{D^4}{d^4}-1\right)}}.$$

On voit que les diaphragmes placés dans le circuit d'air chaud réduisent plus le tirage que lorsqu'ils sont placés en avant du cendrier; parce que la vitesse de l'air chaud est plus grande que celle de l'air froid.

563. Les expériences faites par M. Combes confirment les conséquences que nous avons tirées de la formule de l'écoulement. On a reconnu qu'en fermant l'orifice d'accès de l'air dans le cendrier du foyer d'un générateur par une plaque percée d'orifices de plus en plus petits, la vitesse de l'air qui traversait l'orifice, mesurée au moyen de l'anémomètre, allait toujours en croissant. Voici les détails de cette expérience :

La cheminée avait 20 mètres de hauteur; sa section au bas était de $0^{mq},383$, en haut de $0^{mq},196$; la surface de la grille était de $0^{mq},6525$; la somme des intervalles libres entre les barreaux, de $0^{mq},168$. L'orifice du cendrier a été fermé par une feuille de tôle, percée de 6 orifices carrés égaux, ayant chacun $0^{m},167$ de côté, $0^{mq},028$ de surface, et ensemble une surface égale à la surface libre des barreaux.

On a d'abord laissé tous les orifices libres, et on a observé, à l'aide de l'anémomètre, la vitesse immédiatement après le chargement, et après que le combustible a été soulevé avec un ringard, c'est-à-dire après qu'on a eu fourgonné. Deux expériences faites successivement ont donné pour les vitesses $0^{m},5275$; $1^{m},68$; $0^{m},86$; $1^{m},15$; moyenne, $1^{m},17$.

On a ensuite fermé deux des orifices, et, dans les mêmes circonstances que précédemment, les vitesses observées ont été $1^{m},607$; $1^{m},99$; $1^{m},89$; $2^{m},05$; moyenne, $1^{m},88$.

Enfin on a fermé 4 orifices, et, dans les mêmes circonstances, les vitesses dans les orifices libres ont été de $3^m,51$; $4^m,05$; $2^m,68$; $3^m,46$: moyenne, 3,42.

Dans ces trois séries d'expériences les surfaces d'accès de l'air étaient de $0^{mq},160.0,65 = 0^{mq},1092$; $0^{mq},0728$ et $0^{mq},0364$; et les vitesses moyennes $1^m,17$; $1^m,88$ et $3^m,42$. Ainsi les vitesses d'accès augmentent rapidement à mesure que les sections des orifices diminuent ; pour des orifices dans les rapports des nombres 3, 2 et 1, les vitesses ont augmenté suivant les nombres 1,26 ; 1,65 ; 3.

564. *Anciennes expériences sur l'écoulement de l'air dans les cheminées.* — Il y a un grand nombre d'années, j'ai fait une longue série d'expériences sur l'écoulement de l'air dans les cheminées. J'ai employé des tuyaux de tôle, de fonte et de terre cuite, de différentes hauteurs et de différentes sections. L'appareil était disposé de la manière suivante : la grille était très-grande et en partie seulement couverte de charbon de bois, pour rendre presque nulle la résistance du foyer ; la cheminée était au-dessus de la grille. La température de l'air dans la cheminée était constatée par deux thermomètres, placés l'un au bas, l'autre au sommet. Comme à cette époque on n'avait pas d'anémomètre, je déterminais la vitesse d'écoulement en introduisant rapidement sous la grille, par l'orifice du cendrier, une mèche imbibée d'essence de térébenthine enflammée, fixée à l'extrémité d'une tige de fer, et en la retirant aussitôt ; on produisait ainsi dans le foyer une petite quantité de fumée que l'air chaud entraînait avec lui ; alors en observant l'instant où l'on produisait la fumée et celui où elle paraissait au sommet de la cheminée, on avait le temps qu'elle employait à parcourir la cheminée, et on en déduisait la vitesse d'écoulement. Les expériences ont été répétées en fermant plus ou moins la cheminée, à la partie supérieure et à la partie inférieure, par des diaphragmes formés d'une lame de tôle percée d'une orifice circulaire. La méthode d'observation de la vitesse était trop imparfaite pour conduire à des résultats exacts.

565. On doit à M. le général Morin un grand nombre d'observations relatives à la ventilation et en particulier au tirage des cheminées ; mais ces observations ne s'appliquent qu'à des cheminées dans lesquelles la température est en général très-peu élevée, et ne peuvent guère servir à vérifier les considérations théoriques que nous avons exposées, au moins dans le cas des cheminées d'usine pour lesquelles la température dépasse toujours et notablement celle des expériences de M. Morin. Celles dont les conditions se rapprochent

le plus du cas que nous avons considéré ont été faites sur les cheminées d'appartement. Nous examinerons en particulier celles qui se rapportent à la cheminée du cabinet de M. le sous-directeur du Conservatoire des arts et métiers. (*Études sur la ventilation*, Morin ; tome I^er^, pages 301 et suivantes.)

Dans les expériences dont il s'agit, on a chauffé successivement avec du bois, avec de la houille et avec du gaz d'éclairage.

Les expériences qui s'appliquent au bois sont peu comparables, elles ont en effet fourni une même vitesse pour des excès de température de 75° et de 99°.

Quant au chauffage à la houille, il est bien difficile de comparer les résultats avec ceux qu'on déduirait de la formule à cause des variations de résistance produites à l'entrée de la cheminée, par suite des niveaux différents auxquels a été placée la grille dans les diverses expériences. Il reste donc à considérer le chauffage au gaz ; ici les conditions d'entrée et de sortie de l'air sont restées les mêmes pour toutes les expériences, la température seule de l'air de la cheminée a changé. De plus, il n'y a dans ce cas aucune résistance due à la grille, on peut admettre que celle du circuit qui précède la cheminée est négligeable ; il n'y a donc lieu de considérer que le frottement dans la cheminée.

Voici les principaux résultats obtenus :

TEMPÉRATURES			VITESSE DE L'AIR dans le conduit de la cheminée.
extérieure.	du cabinet.	de la cheminée.	
15	18	68	3.84
20	19	85	4.63
22.5	20	85	4.39
19	20	85	4.64
16	20	26	1.92
17.5	19.5	28	2.65
17.0	18.5	45	2.72
17.75	20.0	66	3.95
15.00	19.0	55.5	3.46
18.00	19.0	65.0	3.84
17.75	20.0	75.0	4.16
18.0	19.5	79.5	4.34

566. Si l'on cherche à construire la courbe qui représente ces résultats d'expérience, en prenant comme abscisses les différences de température observée et comme ordonnées les vitesses, on obtient une série de points qui, joints deux à deux, fournissent une ligne brisée de forme assez bizarre. Ce résultat même indique combien les nombres fournis par l'expérience laissent à désirer et combien ils sont peu comparables. Il est en effet à peu près impossible de se faire, par l'inspection des points de cette ligne, une idée quelque peu nette de la nature de la courbe qui doit représenter la vitesse ; une ligne droite allant d'un des points extrêmes à l'autre paraîtrait la représenter suffisamment, si on se bornait aux seuls résultats de l'expérience, et il en résulterait qu'on pourrait admettre que le tirage augmente proportionnellement à l'excès de la température, à partir d'une certaine valeur ; mais il ne faut pas oublier que la courbe doit passer par l'origine des coordonnées, puisque quand la différence des températures est nulle, il n'y a pas de tirage.

La courbe représentée par la formule

$$v = 0{,}58\sqrt{t-\theta}$$

satisfait à cette dernière condition et passe à des distances plus ou moins rapprochées des points déterminés ; disons qu'il en serait de même de la courbe

$$v = 0{,}636\sqrt{\frac{t-\theta}{1+\alpha t}}$$

qui d'ailleurs diffère très-peu de la première ; l'examen des résultats d'expérience ne permettrait donc pas de décider à laquelle des deux théories du tirage il y a lieu de s'arrêter.

567. Quoi qu'il en soit, si nous prenons la formule :

$$0{,}58\sqrt{t-\theta}$$

qui est celle que nous avons adoptée, nous pourrons nous servir des résultats d'expérience, non pour la contrôler absolument, mais pour en déduire le coefficient de frottement dans un tuyau de poterie, probablement couvert de suie à l'intérieur ; en tenant compte des frottements, la vitesse sera :

$$v = \sqrt{\frac{2g\mathrm{H}\alpha(t-\theta)}{1+\mathrm{A}+\frac{\mathrm{KH}}{\mathrm{D}}}},$$

si nous négligeons 1+A devant $\frac{KH}{D}$, il viendra

$$v = \sqrt{\frac{2ga(t-\theta)D}{K}};$$

et si nous comparons avec

$$v = 0{,}58\sqrt{t-\theta},$$

il viendra :

$$0{,}58 = \sqrt{\frac{2gaD}{K}}.$$

Or, on a $D = \frac{4A}{p}$, A étant la section du tuyau et p, son périmètre. Dans le cas considéré, la section étant de 0,30 × 0,30, réduite à 0^{mq},0868 par les arrondissements aux angles, on aura, en introduisant les valeurs numériques dans la formule :

$$0{,}58 = \sqrt{\frac{19{,}62 \times 0{,}00367 \times 0{,}0868 \times 4}{K \times 4 \times 0{,}30}},$$

d'où

$$K = 0{,}054.$$

Le coefficient de frottement serait dans ce cas à peu près double de ce qu'il est dans les conduites en zinc.

568. *Pressions latérales dans les cheminées.* — Considérons une cheminée placée à la suite d'un fourneau d'une forme quelconque, et supposons qu'on pratique une ouverture en un point de la hauteur; il est évident que l'air extérieur y pénétrera et avec une vitesse d'autant plus grande que l'ouverture sera plus rapprochée du sol. A la partie supérieure cette vitesse est nulle. Cet appel de l'air extérieur aurait également lieu si l'ouverture était faite en un point quelconque de la surface du fourneau. Aussi dans toutes les constructions doit-on chercher à se soustraire aux appels de l'air extérieur par les fissures de la maçonnerie, parce qu'ils occasionnent toujours une perte de tirage, et diminuent souvent l'effet utile du combustible.

569. Il résulte nécessairement de ce que nous venons de dire, que dans l'intérieur du fourneau et de la cheminée, il y a une pression négative, c'est-à-dire plus petite que celle de l'atmosphère, dépression qui va en croissant du cendrier au bas de la cheminée,

et ensuite en décroissant jusqu'au sommet de la cheminée, où elle est nulle.

570. *Effets produits par la rencontre des courants.* — Lorsque plusieurs tuyaux débouchent dans un même canal, les veines d'air se prolongent au delà des orifices, et dans certaines circonstances elles peuvent par leur action mutuelle modifier les vitesses d'écoulement de l'air dans les tuyaux. Si, par exemple, deux tuyaux débouchaient par des orifices en regard dans un même tuyau perpendiculaire, l'influence des veines serait nulle si les deux courants avaient la même vitesse, parce que tout se passerait comme si les veines venaient choquer un plan fixe placé entre elles ; mais si les vitesses étaient inégales, la veine qui aurait la plus grande vitesse diminuerait celle de l'autre, et fermerait plus ou moins l'orifice par lequel celle-ci s'écoule. Un grand nombre de phénomènes ne permettent pas de douter de ce fait ; d'ailleurs, ces veines doivent agir les unes sur les autres à peu près comme des veines d'eau, et on sait, d'après les expériences de Savart, que quand deux veines de même section agissent en sens contraire, et que l'une d'elles a un très-petit excès de vitesse sur l'autre, cette dernière est refoulée jusqu'à l'orifice du vase, et que l'écoulement cesse complétement. On éviterait les effets qui résultent de ces chocs en plaçant dans le tuyau un diaphragme P, comme l'indique la figure 61.

571. Des phénomènes du même genre se produiraient si les deux tuyaux étaient à angle droit, comme dans la figure 62, et ils se trouveraient en outre compliqués de l'effet résultant des pressions latérales. Mais on éviterait complétement ces effets au moyen du diaphragme P.

Si le tuyau était rélargi comme dans la figure 63, le rétrécissement du tuyau en avant de l'orifice du tuyau latéral produirait l'effet d'un diaphragme ; l'influence du choc des veines pourrait être négligée, mais celle de la diminution de pression due au rélargissement du tuyau pourrait être très-grande.

572. Dans le cas où un courant d'air chaud déboucherait horizontalement dans une cheminée d'appel verticale, il pourrait arriver que l'appel fût tout à fait anéanti, quoique la section de la cheminée fût plus grande que celle du courant d'air chaud, si la vitesse de ce dernier était très-grande, parce qu'alors il fermerait la cheminée comme une soupape. C'est un fait que j'ai eu l'occasion de remarquer un certain nombre de fois, et notamment sur une cheminée d'appel que j'avais fait construire dans une fabrique de soude et qui

faisait partie d'un appareil de condensation. La cheminée avait 13^{m},30 de hauteur et près de 0^{mq},75 de section; le canal à fumée

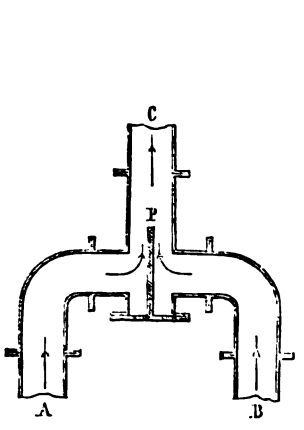


Fig. 61.

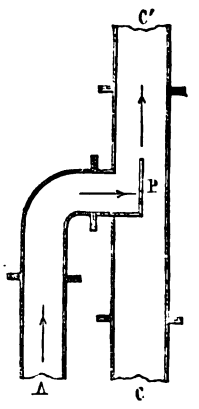


Fig. 62.

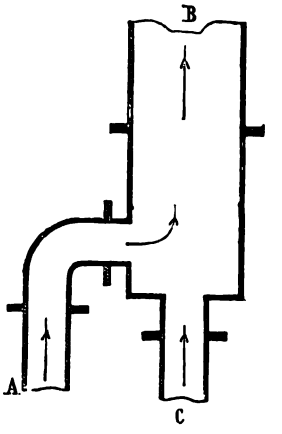


Fig. 63.

d'un four à soude y débouchait horizontalement (*fig.* 64). Lorsque l'on alluma le feu du four à soude, l'appel eut lieu : il augmenta pen-

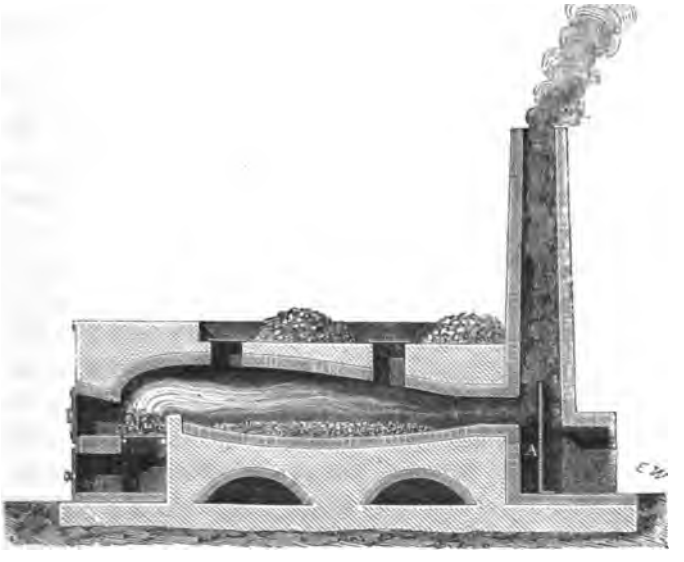


Fig. 64.

dant quelque temps, diminua ensuite, et finit par être complétement nul quand le four commença à travailler. Je reconnus bientôt la

cause de ce phénomène singulier, et j'y remédiai au moyen d'une cloison verticale A placée dans l'intérieur de la cheminée d'appel, de manière que l'air chaud ne fût mis en contact avec les gaz de la cheminée, qu'après avoir pris la même direction verticale.

Ainsi, il faut avoir le plus grand soin, dans toutes les cheminées d'appel qui reçoivent des courants d'air perpendiculairement ou diversement inclinés, de les diriger suivant l'axe de la cheminée avant de les mettre en contact.

573. *Chaleur perdue par les cheminées.* — La quantité de chaleur perdue par les cheminées est en général très-considérable, parce que l'air brûlé est presque toujours abandonné à une température très-élevée, toujours supérieure à celle que prend le corps échauffé. Cette quantité varie avec la température de l'air qui s'écoule, avec le volume d'air froid qui pénètre dans le foyer, et avec le poids de l'eau que renferme le combustible ou qu'il produit par sa combustion, parce que les gaz s'échappent presque toujours à une température trop élevée pour que la vapeur d'eau puisse se condenser. On peut cependant obtenir une évaluation assez approchée de cette perte, en comparant la température de l'air brûlé dans la cheminée à celle qu'il aurait, si toute la chaleur produite était employée à le chauffer; on peut admettre dans ce calcul que les gaz brûlés ont la capacité calorifique de l'air.

Par exemple, dans les générateurs à vapeur, l'air brûlé se dégage à peu près à 300°, et on emploie au maximum 18^{mc} d'air par kilogramme de houille, ou $18.1,3 = 23^{k},4$; en prenant 0,24 pour la capacité calorifique des gaz produits, la température à laquelle ces gaz seraient portés par les 8000 calories résultant de la combustion, serait égale à $8000 : (23,4.\ 0,24) = 1425°$; par conséquent la perte est égale à $300 : 1425 = 0,21$. Cette perte serait évidemment à peu près double ou triple si l'on employait deux ou trois fois plus d'air que nous ne l'avons supposé, et elle se réduirait à 0,1, si on n'employait que le volume d'air rigoureusement nécessaire à la combustion. Dans les circonstances ordinaires on ne peut pas évaluer la perte à moins de 0,25 à cause de la vapeur d'eau produite au moins dans le cas que nous avons choisi. Nous renvoyons au tableau de la combustion du livre I, où nous avons indiqué la perte en calories produite par le tirage dans les conditions courantes et pour les différents combustibles. D'après ces nombres la perte, suivant les circonstances, peut osciller entre 4 et 30 pour 100.

Dans les expériences faites par MM. Scheurer-Kestner et Meunier

sur la combustion de la houille, la température de sortie des gaz est beaucoup moindre que celle que nous avons supposée dans le calcul précédent, le volume d'air employé à la combustion est moindre aussi. Il en résulte que les nombres trouvés expérimentalement sont notablement moindres que ceux que nous avons calculés plus haut; le maximum a été fourni par la houille de Ronchamp, il est de 11,2; le minimum a été obtenu avec la houille du Creusot, il est de 4,4; M. Scheurer-Kestner indique comme valeur moyenne obtenue dans ses expériences le chiffre de 8,1 pour 100. (Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse, 1869.)

Dans les fourneaux employés en métallurgie et pour la production du gaz d'éclairage, l'air brûlé est abandonné à une température beaucoup plus élevée, à cause de la haute température des corps chauffés, et les pertes de chaleur sont beaucoup plus considérables. Elles s'élèvent souvent de 0,80 à 0,90, même quand le volume d'air qui échappe à la combustion est très-petit; mais ces chaleurs perdues peuvent en général être utilisées, du moins en grande partie. L'utilisation des chaleurs perdues est une question de la plus haute importance pour toutes les usines, parce que la dépense de combustible entre presque toujours pour beaucoup dans le prix de revient des produits; nous reviendrons plus loin sur cette question.

574. *Dispositions qui permettent d'utiliser toute la chaleur produite par un foyer.* — Dans les appareils généralement employés, la cheminée est placée à la suite du fourneau, et il en résulte, comme nous venons de le voir, une perte de chaleur qui peut être évitée par certaines dispositions.

Imaginons qu'au-dessus ou à la suite d'un foyer bien encaissé, s'élève une cheminée de 3 ou 4 mètres de hauteur, à parois épaisses et peu conductrices; l'air brûlé aura dans cette cheminée une très-haute température, et acquerra une vitesse d'ascension beaucoup plus grande que celle qui est nécessaire à la combustion. Supposons maintenant qu'au-dessus de cette cheminée, dans son prolongement ou à côté, se trouve la chaudière ou le corps qu'il faut échauffer : on pourra prolonger le parcours de la fumée de manière à la refroidir complétement ou presque complétement, et en quittant les surfaces de chauffe, elle pourra être abandonnée immédiatement dans l'air, ou introduite dans une cheminée qui n'aura d'autre effet que de la rejeter à la hauteur convenable dans l'atmosphère. C'est une disposition analogue qui existe dans les fours à fondre le verre destiné à la gobeleterie; la cheminée de tirage a seulement pour hauteur la

distance de la grille à la voûte du fourneau, et l'air brûlé pourrait se refroidir complétement dans l'arche, si celle-ci avait une longueur suffisante.

575. Au premier abord, cette méthode ne semble applicable qu'autant que les corps qu'on veut chauffer ne doivent être portés qu'à une température qui excède peu la température ordinaire, puisque l'air brûlé ne peut pas être abandonné à une température plus basse que celle de ces corps. Mais en faisant mouvoir le corps à chauffer en sens contraire du mouvement de l'air brûlé, il est évident que, dans presque tous les cas, on pourrait utiliser la totalité de la chaleur de cet air, et le refroidir jusqu'à la température de l'atmosphère.

576. Cette méthode, qui consiste, comme on voit, à placer la cheminée avant la chauffe, a un inconvénient que nous ne devons pas dissimuler. Les surfaces de chauffe doivent être plus grandes que dans les dispositions ordinaires, parce que ces surfaces ne sont pas chauffées directement par le rayonnement du combustible; mais, malgré cet inconvénient, il est beaucoup de cas, comme nous le verrons plus tard, dans lesquels cette méthode pourrait être adoptée avec avantage.

577. On pourrait aussi disposer les appareils de manière à produire le tirage pendant la chauffe. La disposition consisterait à placer dans la cheminée le corps qui doit être échauffé. Si les canaux de circulation sont assez étroits, les surfaces de chauffe assez étendues, l'air brûlé parviendra au sommet de la cheminée à une température peu supérieure à celle du corps chauffé, quoique le tirage soit très-puissant, parce que la vitesse d'ascension dépendra de la température moyenne de l'air brûlé dans les canaux de circulation, et que la température à la partie inférieure sera celle du foyer. Cette disposition se rencontre dans les fours à chaux et dans les fours à plâtre.

CHAPITRE III

Dimensions des cheminées d'usine.

578. L'effet d'une cheminée consiste, comme nous l'avons dit, à appeler dans le foyer le volume d'air nécessaire à la combustion. Le poids de combustible qui doit être brûlé par heure est toujours donné ;

la hauteur de la cheminée est en général déterminée par des conditions particulières, mais la section dépend du volume d'air employé pour brûler chaque kilogramme de combustible, de la température moyenne que l'air conservera dans la cheminée, des pertes de charge provenant des frottements, des changements de section et de direction, et de la résistance de la grille. Les phénomènes qui se produisent dans le tirage d'un fourneau sont tellement compliqués qu'on ne peut pas espérer arriver par de simples considérations théoriques à calculer exactement, et pour tous les cas, la section qu'on doit donner à la cheminée pour produire un effet déterminé. Ces calculs seraient d'autant moins exacts qu'on ne connaît pas d'avance la température de l'air dans la cheminée, la température moyenne de l'air qui circule autour du corps à échauffer, la résistance de la grille, et que ces trois éléments, qu'il serait nécessaire de connaître avant de rien calculer, varient avec l'état du combustible dans le foyer, et avec son épaisseur sur la grille. Ainsi, pour chaque genre de fourneaux, il faut s'en rapporter aux résultats des expériences directes pour connaître la section qu'il convient de donner à la cheminée ; mais il est important de remarquer qu'il y a toujours de l'avantage à donner aux cheminées un excès de section, parce qu'il en résulte un excès de tirage qui peut être nécessaire dans certains cas, et que d'ailleurs on peut toujours maîtriser à l'aide d'un registre.

579. Pour les générateurs à vapeur fixes, disposés suivant la méthode ordinaire, j'ai reconnu, en réunissant un grand nombre de renseignements et les résultats de quelques expériences, que pour des cheminées ayant 10, 20, 30 mètres, renfermant de l'air à 300°, avec des grilles dont la partie libre est égale à la section de la cheminée, et sur lesquelles on brûle 1 kilogramme de houille par décimètre carré et par heure, circonstances qui se rencontrent ordinairement, la vitesse d'accès de l'air froid est à peu près $0{,}18\,v$; $0{,}17\,v$; $0{,}16\,v$; v étant la vitesse théorique.

Pour les hauteurs de 10, 20, 30 mètres que nous avons supposées, et pour une température moyenne de 300° dans la cheminée, les vitesses d'accès de l'air froid, déduites de la formule

$$V = \sqrt{\frac{2gHat}{1+at}},$$

sont

$10^m,13$	$14^m,33$	$17^m,55$

et par suite les vitesses réelles d'accès sont

$$0{,}18 \cdot 10^{m},13 = 1^{m},82 \quad 0{,}17 \cdot 14^{m},33 = 2^{m},44 \quad 0{,}16 \cdot 17^{m},55 = 2^{m},80.$$

Les volumes d'air appelés par heure et par décimètre carré de section étant v. 0,01.3600, seront pour les trois hauteurs

$$65^{mc},52 \qquad 87^{mc},84 \qquad 100^{mc},8$$

et en admettant que la moitié seulement de l'air soit transformée en acide carbonique, et par conséquent que le volume d'air nécessaire pour brûler 1^{k} de houille moyenne soit égal a 18^{mc}, les poids de houille brûlés par décimètre carré de section et par heure seront représentés par les nombres précédents divisés par 18, c'est-à-dire égaux à

$$3^{k},42 \qquad 4^{k},71 \qquad 5^{k},50.$$

Ces nombres diffèrent peu de ceux qui sont adoptés par les ingénieurs les plus expérimentés.

580. Cependant la section qu'ils fournissent doit être encore considérée comme un minimum dans le cas des chaudières ordinaires ; en général, pour les cheminées d'usine on compte par décimètre carré de section au sommet $3^{k},50$ à $4^{k},50$ de houille brûlée : ce dernier chiffre s'appliquant à des cheminées de $30^{m},00$ de hauteur au moins.

La section à donner aux cheminées doit varier d'ailleurs suivant la température à laquelle l'air arrive dans les cheminées, et suivant les résistances que présente au mouvement des gaz la disposition du foyer et des carneaux ; elle dépend aussi dans une certaine mesure de la nature du combustible, la résistance au passage de la grille pouvant être très-différente suivant que le combustible brûle plus ou moins facilement et que par conséquent la grille sera chargée d'une hauteur différente de charbon et que le tirage exigé pour la combustion devra être plus ou moins énergique.

Dans une lettre à M. Burnat, M. Marozeau indique pour des cheminées en fonction, les dimensions suivante :

1° Cheminée desservant 5 foyers brûlant ensemble 500 kilogrammes de houille par heure :

Hauteur.....	$32^{m},50$
Section à la base.....	$6^{m2},75$
Section au sommet.....	$1^{m2},69$

2° Cheminée desservant 5 foyers brûlant ensemble 400 kilogrammes de houille par heure :

Hauteur.....	32^{m},50
Section à la base.....	6^{m2},25
Section au sommet.....	1^{m2},44

3° Cheminée desservant 4 feux brûlant environ 300 kilogrammes de houille par heure :

Hauteur.....	32^{m},50
Section à la base.....	4^{m2},00
Section au sommet.....	1^{m2},00

La section de la première cheminée correspond à 2^{k},95 de houille par décimètre carré ; elle fournit un très-bon tirage.

La section de la seconde correspond à 2^{k},98 par décimètre carré ; le tirage est bon.

Enfin pour la troisième cheminée on trouve 3^{k},00 de houille par décimètre carré de section ; on est alors à la limite d'un bon tirage.

Dans ces trois exemples, les quantités de houille brûlée sont sensiblement égales, et cependant la nature du tirage est loin d'être la même ; M. Marozeau pense qu'il y a lieu d'expliquer la différence par le nombre de foyers desservis. Peut-être aussi faut-il se préoccuper de la valeur absolue de la section de la cheminée et prendre une section relativement plus grande quand cette section est plus faible. En particulier, pour ce qui concerne la troisième cheminée dont le tirage est notablement plus faible que celui des deux premières, on peut attribuer cet effet à ce que la section moyenne de cette cheminée est relativement moindre que celle des deux autres à cause d'un moindre élargissement relatif à la base.

A Dornach, toujours d'après M. Marozeau, on brûle de 1^{k},20 à 2^{k},80 de houille par heure et par décimètre carré de la section supérieure de la cheminée, les cheminées ayant de 27 à 38 mètres de hauteur et les chaudières étant munies de réchauffeurs. Avec les chaudières sans réchauffeurs, on va jusqu'à 4^{k},16 pour l'une des batteries qui est de 4 chaudières dont les produits de la combustion se rendent dans une seule cheminée ; partout le tirage est convenable.

Dans le cas des chaudières marines, la quantité de houille consommée par heure et par décimètre carré de section de la cheminée peut s'élever à 6 kilogrammes et même à 7^{k},50 ; avec des cheminées de 12 à

16 mètres de hauteur, la température au bas de la cheminée est d'après de nombreuses expériences faites par les ingénieurs de la marine égale à 350 ou 400 degrés; la dépression déterminée par le tirage est de 8 à 10 millimètres d'eau. On a constaté qu'au delà de 16 mètres, l'augmentation de la hauteur de la cheminée ne produit pas d'augmentation sensible du tirage ; cela peut tenir à ce que ces cheminées sont en tôle, et que leur refroidissement naturellement rapide doit encore s'accroître à la marche.

Il est bon de considérer que dans les chaudières marines le parcours des gaz est relativement très-court, que les changements de direction sont peu nombreux et qu'enfin le combustible est toujours de qualité supérieure.

581. On voit donc que la quantité de houille brûlée par décimètre carré de la section de la cheminée est plus grande pour les chaudières à bouilleur ordinaire que pour les chaudières à réchauffeur, plus grande encore dans les chaudières marines. On pourra prendre les nombres suivants :

Pour les chaudières	à réchauffeur.....	3. kilog.
—	— à bouilleur ordinaire...	3,5 à 4,5
—	— marines.....	6,0 à 6,5

582. En admettant ces nombres comme ceux qui fournissent la limite d'un bon tirage, nous pouvons nous en servir pour évaluer la valeur totale des résistances dans chacun des foyers que nous venons de considérer. En effet, nous avons pour vitesse d'écoulement de l'air froid :

$$v = \frac{0{,}268}{1 + at} \sqrt{H(t - \theta)(1 + a\theta)}.$$

Si l'on fait $\theta = 0$, et si l'on tient compte des résistances, on aura :

$$v = \frac{0{,}268}{1 + at} \sqrt{\frac{Ht}{1 + R}}.$$

Le volume écoulé par heure et par décimètre carré de la section de cheminée sera :

$$V = 0{,}01 \times 3600 \cdot \frac{0{,}228}{1 + at} \sqrt{\frac{Ht}{1 + R}}.$$

Si p représente le poids de houille brûlée par heure et par décimè-

tre carré de la section de la cheminée, et si nous admettons que dans le cas d'une bonne combustion il entre dans le foyer un volume d'air égal à 14 mètres cubes par chaque kilogramme de houille brûlée, nous avons

$$p \times 14 = 0{,}01 \times 3000 \cdot \frac{0{,}268}{1 + at} \sqrt{\frac{Ht}{1 + R}},$$

d'où :

$$1 + R = \frac{0{,}475 Ht}{(1 + at)^2 p^2}.$$

Pour les chaudières à réchauffer, on peut faire :

$$p = 3, \qquad t = 150 \qquad H = 32^m,$$

on en tire :

$$1 + R = 105.$$

Pour les chaudières ordinaires à bouilleurs,

$$p = 4{,}50, \qquad t = 300, \qquad H = 32^m,$$

et l'on a :

$$1 + R = 52.$$

Dans le cas des chaudières marines, on n'arrive évidemment à $6^k{,}00$ ou $6^k{,}50$ de charbon brûlé par heure et par décimètre carré de section de la cheminée qu'en chargeant fortement la grille : alors l'air qui entre dans le foyer est complétement employé à la combustion, et si l'on considère l'aspect de la fumée noire que lâchent les cheminées, on peut même penser qu'il y a eu insuffisance d'air et que la combustion est incomplète. Si nous supposons l'introduction de la quantité d'air exclusivement nécessaire à la combustion, soit 9 mètres cubes par kilogramme de houille, nous avons en faisant $t = 400°$ et $H = 16^m$,

$$6^k{,}5 \times 9 = 0{,}01 \times 3600 \cdot \frac{0{,}268}{1 + 400 \cdot a} \sqrt{\frac{16 \times 400}{1 + R}},$$

d'où :

$$1 + R = 28.$$

533. La proportionnalité de la section de la cheminée à la consommation de combustible, dans le cas de chaudières ou de foyers appartenant au même type, suppose nécessairement que les résistances

restent constantes, hypothèse qu'on peut admettre ; car les résistances qui proviennent de la grille et des changements de direction du courant, n'éprouvent que peu de variations, et celles qui résultent du frottement n'ont en général que peu d'influence sur la résistance totale. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, il y a peut-être lieu de se préoccuper du nombre de foyers desservis par la même cheminée et de la valeur de la section elle-même ; dans tous les cas, il est bon de disposer d'un certain excès de tirage, sauf à le réduire au moyen d'un registre, si cela est nécessaire.

Le tirage d'une cheminée variant proportionnellement à la section et à la racine carrée de la hauteur, on voit qu'il est préférable au point de vue de la dépense de construction de réduire autant que possible la hauteur et d'augmenter la section ; il en serait de même au point de vue théorique, puisque le frottement dans la cheminée se trouverait alors diminué. Pour la détermination de la hauteur à donner à la cheminée, on est guidé par les considérations suivantes ; il est utile d'avoir une hauteur suffisante pour que la différence de pression produite dans la cheminée puisse s'opposer à l'action des vents ; il faut de plus que la section de la cheminée ne soit pas tellement grande que le courant d'air chaud ne la remplisse pas complétement et qu'il en résulte des courants descendants troublant le tirage ; enfin, dans un grand nombre de localités, et particulièrement dans les villes, des règlements de police déterminent la hauteur minima que doivent avoir les cheminées.

On ne descend jamais au-dessous de 10 mètres pour les cheminées d'usine et on ne dépasse guère 40 mètres. Le plus souvent la hauteur est comprise entre 25 et 35 mètres.

584. *Détermination de la section d'une cheminée.* — Si V est le volume d'air qu'il faut pour brûler 1 kilogramme de houille ; si t est la température de la cheminée ; H, sa hauteur ; $1 + R$, la résistance, et si p est le poids de houille brûlé par heure et par décimètre carré de section de la cheminée, nous avons trouvé :

$$p = \frac{0{,}01 \times 3600 \,.\, 0{,}268}{V \,.\, (1 + at)} \sqrt{\frac{Ht}{1 + R}}.$$

D'autre part, si P est le poids de houille qui doit être brûlé sur la grille en une heure, et si S est la section de la cheminée en décimètres carrés, on aura :

$$P = Sp = \frac{0{,}01 \times 3600 \times 0{,}268}{V(1 + at)} S \sqrt{\frac{Ht}{1 + R}},$$

d'où enfin :

$$S = \frac{PV(1 + nt)}{0{,}01 \times 3600 \times 0{,}268 \sqrt{\frac{Ht}{1 + R}}}.$$

Pour le cas des *chaudières à réchauffeur*, on fera :

$$V = 14, \qquad t = 150, \qquad 1 + R = 105,$$

et on aura :

$$s^{d.m^2} = 1{,}87 \frac{P^k}{\sqrt{H^m}}.$$

Pour le cas des *chaudières ordinaires à bouilleur*, on fera :

$$V = 14^m, \qquad t = 300, \qquad 1 + R = 52,$$

et on aura :

$$S = 1{,}27 \frac{P}{\sqrt{H}}.$$

Et pour les *chaudières marines*, on fera

$$V = 9, \qquad t = 400, \qquad 1 + R = 28,$$

et il viendra :

$$S = 0{,}60 \cdot \frac{P}{\sqrt{H}}.$$

La valeur trouvée devra toujours représenter la section au sommet de la cheminée.

Montgolfier a donné comme règle la formule $S = \frac{P}{\sqrt{H}}$ qui donne une section trop petite, ainsi que la formule $S = 0{,}8 \frac{P}{\sqrt{H}}$ fournie par Tredgold. Il ne faut pas oublier que les nombres que nous avons donnés correspondent à la limite d'un bon tirage, et que par conséquent, il sera bon dans la pratique d'augmenter un peu ces valeurs de S.

D'après Darcet, les cheminées doivent avoir 10 mètres de hauteur, et une section telle que chaque décimètre carré corresponde à une consommation de houille de 3 kilogrammes à $3^k,3$ par heure ; la surface de la grille doit être trois fois plus grande que la section de la cheminée.

Partant de ces données, on voit que S sera compris entre

$$\frac{P\sqrt{10}}{3\sqrt{H}} \quad \text{et} \quad \frac{P\sqrt{10}}{3\,3\sqrt{H}},$$

ou bien entre

$$1{,}05\,\frac{P}{\sqrt{H}} \quad \text{et} \quad 0{,}96\,\frac{P}{\sqrt{H}},$$

valeurs évidemment trop faibles pour un bon tirage.

585. *Section des cheminées des générateurs pour différents combustibles.* — Considérons deux générateurs de même forme et de mêmes dimensions, dont les foyers sont alimentés par des combustibles différents, ne renfermant que du carbone et des matières fixes ; il est évident que, si pour chacun d'eux la même portion d'air échappait à la combustion, les phénomènes seraient sensiblement les mêmes ; il n'y aurait de différence que celle qui résulterait des quantités inégales de chaleur rayonnée, et des résistances inégales du foyer ; mais ces différences seraient peu importantes et ne pourraient pas en apporter sensiblement dans le poids de carbone brûlé par décimètre carré de cheminée. Mais, si l'un des combustibles renferme de l'eau ou en produit, les sections des cheminées, pour le même poids de combustible, ne seront plus les mêmes. Dans ce cas, on peut admettre, comme une approximation suffisante pour la pratique, que les sections des cheminées sont proportionnelles aux volumes de gaz qu'elles doivent laisser écouler pour la combustion d'un même poids des différents combustibles. Alors si on désigne par S la section de cheminée nécessaire pour brûler un poids P de houille, par S′ la section de cheminée correspondant à la combustion d'un poids P d'un autre combustible, par V et V′ les volumes des gaz qui se dégagent à la suite de la combustion d'un kilogramme des deux combustibles, on aura $S' = S.\ V' : V$; d'après cela nous obtiendrons les résultats suivants :

Bois sec.....	$S' = S \cdot \frac{8}{12} = 0{,}66S$
Bois à 0,30 d'eau.....	$S' = S \cdot \frac{6{,}5}{12} = 0{,}54S$
Tourbe à 0,25 d'eau.....	$S' = S \cdot \frac{7{,}2}{12} = 0{,}60S$
Charbon de bois.....	$S' = S \cdot \frac{12}{12} = 1{,}00S$

Coke à 0,05 de cendres..... $S' = S \cdot \frac{13}{12} = 1{,}08S$

Ces nombres supposent nécessairement que les résistances des grilles sont sensiblement les mêmes pour tous les combustibles ; et il n'en est pas tout à fait ainsi, car tous les combustibles ne sont pas sujets à encrasser les grilles comme la plupart des houilles ; mais, comme nous le verrons plus loin, on emploie pour le coke, le bois, le charbon de bois, la tourbe, des surfaces de grille plus petites que pour la houille, de sorte que les résistances des grilles ne doivent pas beaucoup différer. Ils supposent également que les autres résistances ne changent pas avec la section, car c'est à cette condition que les volumes d'air écoulés sont proportionnels aux sections ; mais quand les formes des générateurs sont les mêmes, il y a le même nombre de changements de direction, et les différences de section n'ont qu'une faible influence sur la résistance totale. Au reste, il ne faut considérer ces nombres, ainsi que je l'ai déjà dit, que comme des valeurs approchées, mais représentant toujours des sections produisant un bon tirage.

586. Il est important d'examiner ce qui arriverait si la cheminée seulement ou tout le circuit avait une section plus grande que celle qui résulte des déterminations précédentes.

Supposons d'abord qu'on donne à la cheminée seule une plus grande section ; le tirage augmentera, à cause de la détente que l'air chaud éprouvera en y pénétrant, et à cause de la diminution du frottement ; mais en général cet accroissement de tirage sera peu considérable, et, si la cheminée est trop large, la vitesse d'écoulement de l'air chaud pourra se trouver assez diminuée pour que le tirage soit modifié par l'influence des vents. Il pourrait même arriver, si la section de la cheminée était beaucoup trop grande, que le courant d'air chaud ne la remplît pas complétement, et qu'il s'établît dans la cheminée des courants d'air de haut en bas qui diminueraient beaucoup le tirage. Dans ce cas, il faudrait réduire la section de la cheminée par un registre placé à la partie supérieure.

Si, au contraire, on diminuait la section de la cheminée de manière à la rendre beaucoup plus petite que celle des carneaux, il y aurait une perte de charge qui amènerait une diminution dans la quantité d'air appelé, et l'accroissement de la température qui en résulterait pour les gaz de la combustion pourrait en partie rétablir le tirage dans le cas où la température primitive aurait été au-dessous de la température du maximum de tirage ; ce serait le

contraire si la température était plus élevée que celle du maximum.

587. Si on donnait aux carneaux, à la grille et à la cheminée une section beaucoup plus grande que celles que nous avons indiquées, il est évident que, pour une consommation de combustible constante obtenue par la fermeture plus ou moins grande du registre, les résistances s'affaibliraient à mesure que la section augmenterait, et on finirait par obtenir pour les vitesses d'accès et de sortie des gaz les vitesses théoriques. Il ne serait pas nécessaire pour cela que le diamètre du canal fût très-grand ; car, s'il était seulement égal à 5 fois le diamètre calculé, les vitesses seraient 25 fois plus petites, et toutes les espèces de résistances $25.25 = 625$ fois plus petites. Ce serait par conséquent un moyen infaillible de supprimer toute espèce de résistance ; mais alors, pour soustraire le tirage à l'influence des vents, le registre devrait être placé au sommet de la cheminée. Cette disposition augmenterait beaucoup les frais de construction et les pertes de chaleur par la surface du fourneau et de la cheminée ; aussi elle n'est jamais employée.

588. *Influence du refroidissement de la surface extérieure des cheminées sur le tirage.* — On pourrait penser que pour les cheminées isolées, parcourues par de l'air à une température voisine de 300°, la quantité de chaleur émise par la surface étant considérable, l'air éprouve un grand refroidissement qui diminue le tirage ; mais il n'en est rien: la quantité de chaleur entraînée par l'air chaud est toujours très-grande relativement à celle qui est perdue par la surface de la cheminée, et le refroidissement de l'air n'a pas d'effet sensible. Considérons, par exemple, une cheminée de 20 mètres de hauteur, $0^m,5$ de diamètre et $0^{mq},196$ de section, renfermant de l'air à 300. La vitesse théorique d'accès de l'air froid par un canal ayant la section de la cheminée sera de $11^m,93$, la vitesse réelle de $11^m,93.0,165 = 1^m,968$, le volume d'air appelé par heure de $1,968.3600 = 7084$ mètres cubes dont le poids est de $7084.1^k,3 = 9209$ kilogrammes, et la quantité de chaleur entraînée par heure à très-peu près de $9209.300 : 4 = 553175$ unités de chaleur. Or, d'après les formules du refroidissement que nous verrons plus loin, la quantité de chaleur émise par mètre courant et par heure dans ces conditions, est de 1587 ; pour les 20 mètres, la perte sera donc de $1587 . 20 = 31740$. Le rapport de 31740 à 553175 est 0,057. Ainsi, la chaleur perdue par la cheminée n'est pas les 6 centièmes de la chaleur entraînée par l'air ; par conséquent, la température de l'air ne sera

pas abaissée de 0,06, c'est-à-dire qu'elle demeurera supérieure à 282°, et le tirage ne sera pas sensiblement changé.

Quant à la quantité de chaleur qui produit le travail même du tirage, elle est tout à fait négligeable, car en supposant une cheminée de 30 mètres de hauteur, dans laquelle la fumée serait à 300°, cette quantité de chaleur correspond à un abaissement de température de 1° environ dans la cheminée.

589. Pour une cheminée en tôle de mêmes dimensions, la quantité de chaleur émise serait, d'après les formules du refroidissement, 8037 par mètre courant, et 160740 pour les 20 mètres. Le rapport de la chaleur perdue à la chaleur entraînée par l'air serait alors 160740 : 553175 = 0,29. Ainsi, la température s'abaisserait de 87°, et l'air chaud s'échapperait à 213° environ, ce qui correspond à une diminution de 0,1 à peu près dans le tirage.

590. *Cheminées communes à plusieurs fourneaux.* — Dans la plupart des grandes usines, on ne construit qu'une seule cheminée pour tous les fourneaux ; on y trouve deux avantages : 1° une économie dans les frais de construction ; 2° une uniformité de tirage qui n'existe point dans une cheminée qui ne correspond qu'à un seul foyer. L'économie est évidente, car une seule cheminée coûte moins de construction que plusieurs, en supposant la section de la cheminée unique égale à la somme des sections des autres. Quant au second avantage, il faut remarquer que, dans un fourneau ayant une cheminée spéciale, le tirage est très-variable ; il est faible immédiatement après le chargement du foyer et il s'élève à mesure que la combustion devient plus active. Il diminue surtout par l'ouverture des portes du foyer. Mais si plusieurs fourneaux communiquent avec une cheminée commune, et si on a soin de ne charger les foyers que successivement, il s'établira dans la cheminée un tirage moyen qui sera d'autant plus régulier que les fourneaux seront plus nombreux.

On donne ordinairement pour section à une cheminée commune la somme des sections des cheminées partielles qui correspondraient à chaque fourneau. La section ainsi obtenue est certainement trop grande, parce que la résistance est beaucoup plus petite que la somme des résistances dans les cheminées partielles qu'elle remplace. Mais cet excès de tirage, qu'on peut toujours modérer à volonté, ne présente aucun inconvénient.

591. *Cheminées dans lesquelles les fumées et les gaz solubles dans l'eau sont précipités ou absorbés par des injections d'eau.* — On a proposé de faire précipiter les fumées et de dissoudre les gaz

solubles qui, dans certaines circonstances, se trouvent mêlés aux gaz sortant des foyers, en faisant tomber de l'eau sous forme de pluie très-fine dans des canaux horizontaux que les gaz parcourraient avant de se rendre dans la cheminée ; mais les gaz étant presque complétement refroidis, il faudrait les réchauffer pour produire le tirage.

M. Hedley, maître de forge à Newcastle-on-Tyne, a imaginé de faire circuler la fumée dans une série de tuyaux verticaux, qu'elle parcourait successivement de bas en haut et de haut en bas, et, dans chacun des tuyaux où la fumée descendait, il faisait tomber de l'eau très-divisée ; malgré le refroidissement, le tirage était très-grand, même pour des tuyaux de 3 à 4 mètres de hauteur. Par ce procédé, on peut recueillir en partie les matières entraînées par les gaz, et notamment le noir de fumée qui surnage au-dessus du liquide écoulé. Cette disposition a été appliquée avec succès à un générateur du chemin de fer de Sunderland à Durham. Quoique ce mode de condensation des fumées soit connu depuis longtemps, il n'a point été adopté par l'industrie, parce qu'il est compliqué, qu'il exige un certain travail pour élever les eaux de condensation, et que les eaux sales seraient souvent d'un grand embarras ; mais cette disposition serait très-avantageuse lorsque dans les gaz qui s'échappent des fourneaux se trouvent, indépendamment de ceux qui proviennent de la combustion, des gaz et des vapeurs nuisibles, comme dans les fours à soude, ou des matières solides entraînées par le courant et qu'il est utile de recueillir, ce qui arrive dans les fourneaux où l'on traite le plomb ou le zinc.

592. Dans le cas particulier où, abstraction faite du tirage lui-même, on a intérêt à se débarrasser absolument des substances solides ou liquides à l'état de suspension dans un courant de gaz, on peut employer le procédé de M. Colladon, qui consiste dans l'emploi de capacités remplies de coke qu'on fait traverser par le gaz qui circule de bas en haut ; le coke est entretenu humide par un filet d'eau continu.

On peut aussi employer le procédé de MM. Pelouze et Audouin (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1873), applicable surtout aux substances condensables. On fait écouler le gaz par une série d'ouvertures de faible diamètre sous forme de jets qui viennent s'étaler sur une surface plane placée vis-à-vis ; le contact mutuel des particules est rendu plus effectif par le choc contre cette surface. Une pression de deux centimètres d'eau suffit pour obtenir

des résultats satisfaisants. Appliqué au gaz d'éclairage, ce procédé détermine la condensation du goudron, de l'ammoniaque, de l'hydrogène sulfuré et du sulfure de carbone. Dans une usine à coke qui produit plus de 100000 mètres cubes de gaz par jour, on a pu augmenter de 1/40 environ la proportion des goudrons, et l'eau ammoniacale présentait une richesse qui était plus du double de celle qu'on obtient des eaux de condensation.

Les auteurs signalent la possibilité d'appliquer leurs procédés à la production de la vapeur sèche, à l'élimination des fumées, des poussières, etc.

CHAPITRE IV

Cheminées d'appel.

593. Toutes les cheminées sont réellement des cheminées d'appel, mais on désigne plus spécialement sous ce nom des cheminées qui ont pour objet de produire un renouvellement d'air nécessaire à l'assainissement des lieux habités. Dans ces appareils, les phénomènes qui se produisent sont beaucoup plus simples que dans les cheminées d'usine. En effet, l'air appelé, étant en général peu échauffé, n'est pas obligé de traverser en totalité la grille du foyer, qui n'occupe qu'une faible partie de la section de la cheminée ; le foyer est même souvent placé latéralement, de manière que la section de la cheminée ne soit pas sensiblement changée dans le voisinage de la grille ; la résistance de celle-ci peut alors être complétement négligée, et les résultats du calcul présentent une grande certitude. Lorsqu'une grille est entièrement couverte de combustible, que la totalité de l'air appelé par la cheminée est obligée de la traverser, et qu'il n'y a point de perte sensible de chaleur par le rayonnement, la température de l'air au delà de la grille est d'environ 1200° et le volume d'air appelé par kilogramme de houille est de 18 mètres cubes. Pour les cheminées d'appel, au contraire, il est rare que l'air soit échauffé de plus de 20° ; la chaleur qu'il absorbe par mètre cube est de $1^k,3.\ 20.\ 0,25 = 6,5$, et, par conséquent, le volume d'air appelé par kilogramme de houille est de $8000 : 6,5 = 1230$ mètres cubes.

594. Pour commencer par le cas le plus simple, considérons une cheminée d'appel ayant une hauteur H, un diamètre D, communiquant par la partie inférieure avec un canal cylindrique, d'une lon-

gueur l et d'un diamètre d plus petit que D ; désignons par t et θ les températures de l'air de la cheminée et de l'air du canal. En désignant par P la différence des pressions au bas de la cheminée et en appelant p la charge correspondante à la vitesse effective, nous aurons :

$$P - p = \frac{Kl}{d} p + \frac{KH}{D} \cdot \frac{d^4}{D^4} p + p + (A - B)p;$$

les deux premiers termes du second membre de l'équation représentent la résistance provenant du frottement dans le canal et dans la cheminée ; le troisième, la perte de charge due au changement brusque de direction ; le dernier, la perte de charge à l'entrée dans le canal et l'accroissement de charge à l'entrée dans la cheminée. Mais, en général, les tuyaux de conduite sont assez longs pour que leur résistance soit toujours très-grande relativement à la valeur de A — B : ainsi, le second membre de l'équation peut être réduit aux trois premiers, ce qui donne pour la vitesse de l'air chaud

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t - \theta)}{1 + a\theta}} \sqrt{\frac{1}{\frac{Kl}{d} + \frac{KH}{D} \cdot \frac{d^4}{D^4} + 2}} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

595. Supposons, par exemple, une cheminée carrée communiquant avec un canal ayant également un carré pour section ; prenons $H = 30^m$, $D = 1^m$, $d = 0^m,5$, $l = 500^m$, $\theta = 15°$, $t = 35°$; la formule (1) devient :

$$v = \sqrt{\frac{19,62 \cdot 30 \cdot 0,00366 \cdot 20}{1 + 0,00366 \cdot 15}} \sqrt{\frac{1}{74 + 0,72 + 2}} = 6,4 \cdot 0,193 = 1^m,23.$$

La vitesse d'accès sera :

$$\frac{v(1 + a\theta)}{1 + at} = 1,23 \times 0,935 = 1.15.$$

La section du canal étant $0^{mq},25$, le volume d'air appelé sera par seconde $1,15 \cdot 0,25 = 0^{mc},037$, et par heure $0,288 \cdot 3600 = 1288^m$; la dépense de chaleur sera à peu près par heure de $1037 \cdot 1^k,3 \cdot 20$ $0,24 = 6471$, nombre un peu inférieur à la quantité de chaleur produite par la combustion de 1^k de houille.

596. Considérons maintenant le cas le plus général : supposons que la cheminée, toujours prismatique, communique avec un canal contourné dans tous les sens, et dont les diverses parties sont à des températures différentes. Les variations de température agiront

de deux manières : 1° en modifiant la charge qui produit l'écoulement ; 2° en produisant des variations de vitesse, et par suite des variations dans la résistance due au frottement. Mais, comme l'influence des variations de température sur la vitesse, et par suite sur le frottement, est très-faible, on pourra sans erreur sensible supposer que la vitesse varie seulement en raison inverse des sections. Alors, en désignant par P et R la charge et la somme totale des résistances, la vitesse d'écoulement sera donnée par la formule :

$$v = \sqrt{\frac{2gP}{1+R}}.$$

La valeur de R se calculera par les méthodes que nous avons indiquées en parlant de l'écoulement des gaz comprimés.

Nous examinerons en détail les différentes questions qui se rattachent aux cheminées d'appel, lorsqu'il sera question de la ventilation des lieux habités.

CHAPITRE V.

Construction des cheminées.

597. La section et la hauteur des cheminées pouvant être déterminées par les considérations qui précèdent, il ne nous reste plus qu'à examiner la nature des matériaux, les épaisseurs et les dispositions générales qu'il convient d'employer. C'est ce que nous allons faire, en considérant successivement les cheminées d'usine et les cheminées d'habitation.

Cheminées d'usine.

598. Les cheminées d'usine sont toujours isolées ; elles sont en briques ou en tôle ; avec l'un ou l'autre de ces matériaux, dans les mêmes circonstances, elles produisent sensiblement le même effet, parce que le refroidissement que l'air éprouve dans les cheminées métalliques n'a pas d'influence sensible sur le tirage.

599. La forme la plus convenable de la section, au point de vue de la diminution des résistances, est celle qui, pour une surface donnée, a le minimum de contour ; c'est par conséquent la forme circulaire, et ensuite, les formes polygonales d'un grand nombre de

côtés. On donne toujours la forme circulaire aux sections des cheminées métalliques. Quant aux cheminées en briques, la section est circulaire, carrée et bien rarement octogonale ; les cheminées rondes sont en général préférées ; elles exigent, à section égale, moins de matériaux pour leur construction.

600. Examinons maintenant la forme de la section verticale qui passe par l'axe. Quand les cheminées n'ont qu'une petite hauteur, on les fait quelquefois prismatiques intérieurement, en donnant aux murailles une épaisseur plus grande à la base qu'au sommet (*fig.* 65 et 66). Cette forme de cheminée est particulièrement employée pour les fours à puddler, ou à réchauffer, qui reçoivent des fumées à une très-haute température ; elle se prête à une forte consolidation au moyen d'armatures en fer placées aux angles, sur le parement extérieur ; leur hauteur est de 12 à 14 mètres.

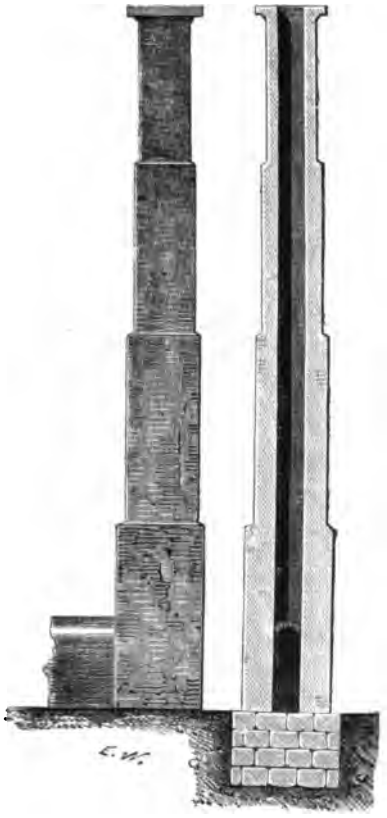


Fig. 65. *Fig.* 66.

Quand les cheminées doivent avoir une grande hauteur, on leur donne toujours une forme pyramidale ou tronc-conique en dedans et en dehors, pour augmenter la surface de la base sur laquelle elles reposent, tout en réduisant, autant que possible, le cube de maçonnerie. Il est impossible de calculer les pentes intérieures et extérieures, parce que le calcul devrait reposer sur un trop grand nombre d'éléments inconnus. Nous nous contenterons de rapporter les pentes qui ont été reconnues suffisantes par la pratique.

601. Dans les grandes cheminées d'usine, la pente intérieure par mètre courant est d'environ $0^m,012$ à 0,018 ; et la pente extérieure varie de 0,025 à 0,035. L'épaisseur de la maçonnerie au sommet est de 0,11 ou de 0,22, la largeur ou la longueur d'une brique ordinaire. D'après cela, si

on désigne par d le diamètre intérieur au sommet d'une cheminée, par d' son diamètre extérieur, et par D et D' les diamètres intérieur et extérieur au bas de la cheminée, on aura

$$d' = d + 0{,}22 \quad \text{ou} \quad d' = d + 0{,}44, \quad D = d + 2Hm, \quad D' = d' + 2Hm',$$

m étant compris entre 0,012 et 0,018, et m' entre 0,025 et 0,035.

Supposons, par exemple, une cheminée de 20 mètres de hauteur et de 0,60 de diamètre intérieur au sommet ; le diamètre intérieur D au bas sera, en prenant $m=0{,}014$, de $1^m,16$; le diamètre extérieur d' au sommet sera de $0{,}60+0{,}22=0^m,82$; et le diamètre extérieur D' en bas, en prenant $m'=0{,}03$, sera de $2^m,02$. On peut alors facilement tracer le profil de la cheminée dans chaque cas particulier.

Dans les exemples de cheminées que nous avons donnés n° 580, on a pour les deux premières $m=0{,}02$ et pour la troisième $m=0{,}0154$. On voit que dans cette troisième cheminée la section moyenne sera plus faible par rapport à la section au sommet, et c'est probablement à cette cause qu'est dû le plus faible tirage observé.

602. Si l'on voulait construire des surfaces coniques intérieures et extérieures, l'exécution serait assez difficile, et on serait obligé d'entamer beaucoup de briques, ce qui exigerait une main-d'œuvre coûteuse ; d'ailleurs, les briques résistent beaucoup moins quand elles sont cassées que quand elles sont entières, parce que leur croûte extérieure a une bien plus grande ténacité que les parties intérieures.

On pourrait construire les cheminées coniques ou prismatiques par une suite de cylindres ou de prismes, qui produiraient des retraits brusques à l'intérieur et à l'extérieur ; mais comme construction la disposition représentée (*fig.* 74) est bien préférable.

La cheminée est conique ou pyramidale à l'extérieur, et l'épaisseur de la maçonnerie varie par sauts brusques à l'intérieur ; les retraits ont lieu par largeur ou demi-largeur de brique.

603. Les cheminées en briques ont ordinairement de 20 mètres à 30 mètres de hauteur, plus rarement 40. M. Grouvelle cite une cheminée construite à Manchester, qui a 125 mètres de hauteur, $7^m,50$ de diamètre extérieur à la base et $2^m,70$ au sommet ; on a employé 4,000,000 de briques dans sa construction.

604. Les cheminées coniques en briques sont montées sur des socles prismatiques ou cylindriques, établis au-dessous ou au-dessus du sol et percés d'ouvertures destinées à recevoir les canaux qui doi-

vent amener la fumée dans la cheminée. L'une de ces ouvertures, qui est ordinairement fermée par un mur en briques de peu d'épaisseur, sert à introduire de temps en temps dans la cheminée l'ouvrier qui doit la nettoyer ou la réparer.

Pour cet objet, la cheminée est garnie à l'intérieur de barres de fer ou étriers, scellées dans la maçonnerie et espacées de 0m,50, qui forment une échelle au moyen de laquelle on s'élève facilement jusqu'au sommet.

Quand le socle est établi au-dessus du sol, il n'y a aucune raison pour lui donner la forme du piédestal d'un ordre achitectural ; une cheminée n'est pas une colonne et ne saurait en avoir les proportions.

Il est important de n'établir une cheminée que sur des fondations bien solides. On les fait parfois sur pilotis.

Dans tous les cas, il importe qu'elles ne cèdent pas sous le poids de la cheminée, car l'affaissement se fait souvent inégalement ; et, quand il a lieu, il en résulte sinon la chute de la cheminée, au moins une déviation nuisible et dangereuse. C'est un point auquel les constructeurs n'attachent pas en général assez d'importance.

605. Dans les cheminées qui doivent recevoir de l'air à une température très-élevée, comme celles des fourneaux à réverbère, il faut employer des briques réfractaires et les lier entre elles avec de la terre à briques. Dans les cheminées qui, comme celles des chaudières à vapeur, ne doivent recevoir que des fumées à une température rarement supérieure à 300°, on peut employer des briques ordinaires réunies par du mortier de chaux et de sable siliceux ; il serait cependant utile d'employer des briques réfractaires pour le revêtement de la partie intérieure du bas de la cheminée. Le plâtre ne doit jamais être employé quand la température de la fumée doit dépasser 100°, parce qu'à cette température il commence à perdre l'eau hygrométrique qu'il renferme, et par suite sa ténacité.

606. Les grandes cheminées isolées se construisent sans échafaudage extérieur quand leur diamètre est assez grand ; l'ouvrier s'élève progressivement en s'échafaudant sur les étriers en fer dont nous avons parlé plus haut. Un bon ouvrier, habitué à ces sortes de constructions, aidé d'un garçon qui lui porte les briques et le mortier, peut élever ainsi en quinze jours une cheminée pyramidale de 13 à 14 mètres de hauteur, de 2 mètres de diamètre extérieur et de 1 mètre de diamètre intérieur à sa base, et de 0,80 et 0,60 de diamètres extérieur et intérieur au sommet.

607. Les cheminées sont ordinairement terminées par une sorte de chapiteau, destiné à les protéger contre les eaux pluviales.

Souvent le chapiteau est en briques comme le reste de la cheminée ; quelquefois il est en pierres de taille.

608. Les chapitaux en briques, s'ils n'étaient protégés, laisseraient pénétrer les eaux pluviales à travers la maçonnerie, et il en résulterait une détérioration rapide ; on les recouvre quelquefois à cet effet d'une couche de ciment, mais il est bien préférable de les revêtir d'une plaque mince de fonte ou d'une épaisse feuille de tôle qui s'étend sur toute sa partie horizontale, et qui se replie de $0^m,10$ à $0^m,15$ en dedans.

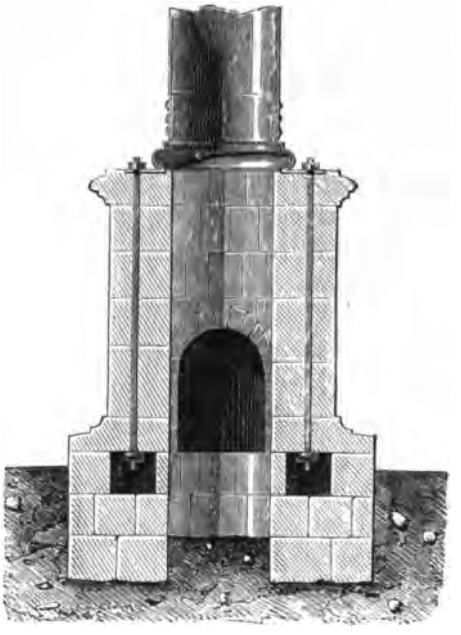


Fig. 67.

609. La figure 67 représente une coupe de la disposition qu'on emploie pour établir les grandes cheminées de tôle ; le corps de la cheminée est fixé par des rivets à un socle en fonte, fixé lui-même

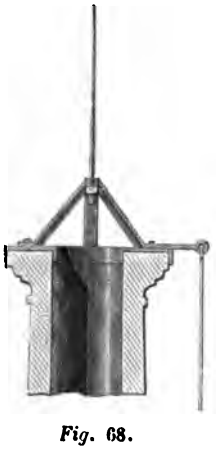


Fig. 68.

Fig. 69.

sur un massif de maçonnerie de briques au moyen de quatre boulons

qui traversent le massif. Quand ces cheminées sont très-élevées, on les maintient par des haubans amarrés dans le sol ou dans les constructions voisines. Pour s'opposer à l'oxydation du métal, on recouvre la cheminée d'une couche de goudron de houille, qui supporte une température assez élevée sans s'altérer.

610. Les cheminées d'usines isolées et très-élevées provoquent la chute de la foudre et par leur élévation et par la grande conductibilité de la suie qui recouvre leur surface intérieure ; aussi les armet-on d'un paratonnerre. Les figures 68 et 69 représentent les dispositions généralement employées. Dans la première, quatre tiges, rivées au chapeau de tôle qui enveloppe le chapiteau, supportent la tige du paratonnerre, une des tiges se prolonge horizontalement, et à son extrémité est attaché le conducteur métallique. La seconde représente un paratonnerre d'une cheminée en tôle. La tige du paratonnerre est supportée par trois tiges rivées sur les bords de la cheminée qui sert elle-même de conducteur, et la chaîne destinée à établir la communication avec un puits est fixée à sa partie inférieure.

Pour l'installation d'un paratonnerre, il faudra se référer aux instructions spéciales à cet objet, et qui sont à observer pour une cheminée aussi bien que pour les bâtiments. (Voir *Annales de chimie et de physique*, 4me série, tome XIV.)

611. Quand les cheminées isolées sont très-élevées, et qu'elles doivent recevoir de l'air à une haute température, il est nécessaire de les armer pour augmenter leur résistance. On trouve dans la cheminée à section carrée des fours à puddler, ou à souder le fer, un exemple du genre d'armature employé dans ces cas. Pour les cheminées coniques, on place des cercles en fer dans l'épaisseur des maçonneries.

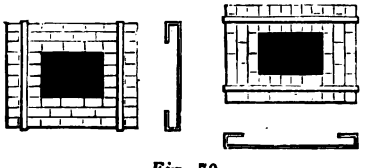


Fig. 70

Dans les cheminées rectangulaires de chaudières à vapeur, on réduit l'armature à la pose, dans la maçonnerie, d'un certain nombre de fers feuillards reployés par les deux bouts pour embrasser deux ou trois rangs de briques et qui se croisent alternativement comme l'indique la figure 70. Ce mode d'armature s'emploie aussi pour les parois des fourneaux de chaudière.

612. Les figures 71 et 72 représentent une grande cheminée d'usine à section circulaire, construite sur les plans de MM. Laurens

et Thomas. La cheminée a 40^{m} de hauteur ; le diamètre est à la base de 3^{m},35, au sommet de 2^{m},02; ainsi la pente intérieure par mètre sur l'axe est de 0^{m},016; le diamètre extérieur au bas est de 5,65, et en haut de 2,52; la pente extérieure est de 0^{m},030 par mètre. La cheminée est formée de 5 rouleaux ayant chacun à peu près 8 mètres de hauteur, et coniques à l'intérieur et à l'extérieur; l'épaisseur de la maçonnerie est de 3 briques pour la première partie et se réduit successivement à 2 briques 1/2, 2 briques, 1 brique 1/2 et 1 brique pour les autres parties. Dans l'épaisseur de la maçonnerie se trouvent 38 cercles de fer feuillard *hh'*, *ii'*. La première partie de la cheminée a un revêtement intérieur en briques demi-réfractaires. Le sommet est recouvert d'une plaque de fonte *ab*, en quatre pièces boulonnées entre elles.

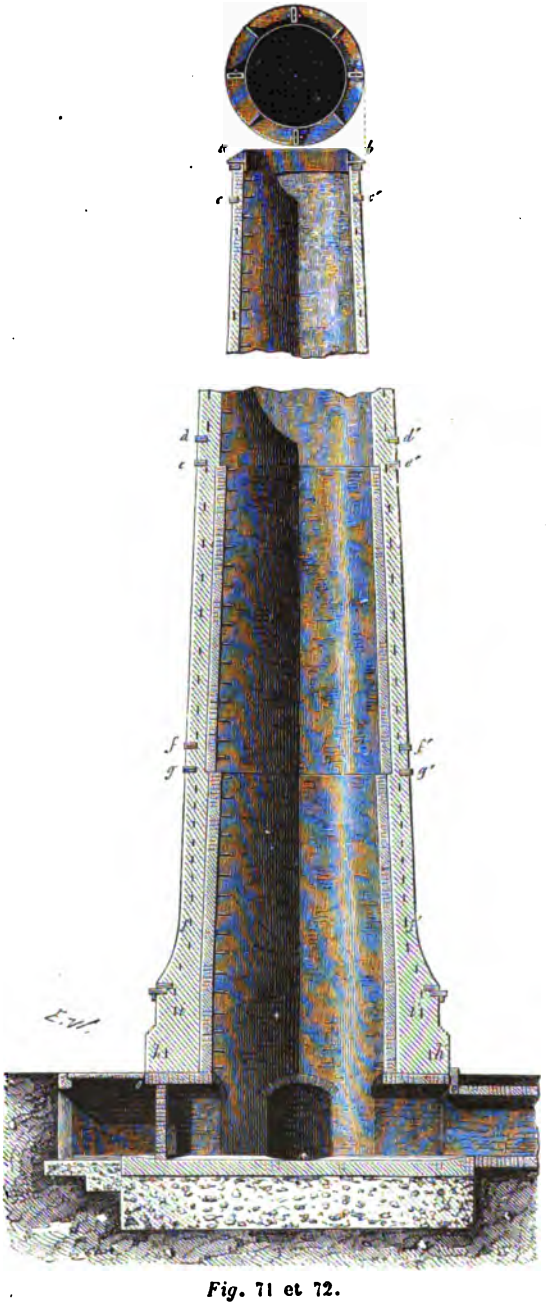


Fig. 71 et 72.

Les ingénieurs précités ont mis aussi

souvent dans leurs cheminées, à la base des rouleaux, en *cc'*, *dd'*, *ff'*, *gg'*, des cordons légèrement saillants en briques de choix et de couleur. Le champ de l'anneau formé par deux cordons voisins reçoit divers dessins simples formés avec des briques de couleur plus foncée que le fond; cet arrangement qui produit une ornementation sobre est surtout favorable à la solidité en forçant les maçons à placer des briques de choix, hourdées avec soin à la base de chaque rouleau. Ce genre d'ornementation a été imité avec exagération, et par suite d'une façon peu heureuse, comme on a pu le voir en 1867 à l'Exposition universelle.

613. *Registres.* — Dans tous les appareils de chauffage, quelles que soient d'ailleurs leurs dimensions et leurs destinations, il est toujours nécessaire de placer, au bas ou au sommet des cheminées, une plaque de tôle ou de fonte au moyen de laquelle on puisse, à volonté, diminuer le tirage, et que l'on ferme quand on suspend le chauffage. Les registres sont très-utiles dans les appareils qui ne fonctionnent que par intermittence, parce que, le courant d'air étant intercepté, le fourneau se refroidit très-lentement.

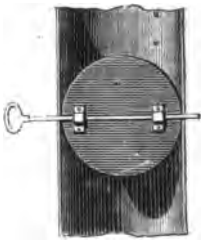


Fig. 73.

614. On peut les disposer d'un grand nombre de manières différentes. Dans les appareils d'une petite dimension dont les cheminées sont en tôle ou en fonte, on règle l'ouverture de la cheminée par une plaque elliptique (*fig.* 73) mobile autour d'un axe, qui traverse les parois opposées du tuyau et que l'on fait mouvoir par une clef extérieure.

615. Cette disposition pourrait également être employée dans les appareils d'une grande dimension; mais comme le frottement seul de l'axe contre les douilles qui le supportent ne serait pas suffisant pour maintenir la plaque dans sa position, il faudrait fixer à l'axe, et en dehors de la cheminée, une tige (*fig.* 74) perpendiculaire à sa direction, percée à son extrémité d'un trou par lequel on ferait passer une broche qui pénétrerait dans une série de trous disposés circulairement dans une plaque de fonte placée contre la cheminée, et espacés pour permettre des passages divers et déterminés; la plaque mobile devrait être en fonte, parce que la tôle serait bientôt oxydée, et même, si la fonte n'avait pas une certaine épaisseur, elle

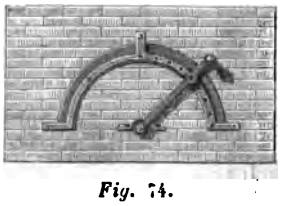


Fig. 74.

serait sujette à se voiler, surtout si la température de la fumée était très-élevée. Pour un canal horizontal, on peut employer la disposi-

Fig. 75.

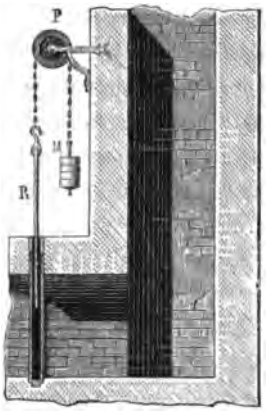


Fig. 76.

tion indiquée (*fig.* 75). Le registre est une plaque en fonte *b* mobile autour d'un axe sur un pivot *c*, qu'on applique au moyen d'une manivelle *a* sur un cadre en fonte, quand on veut arrêter l'appel de la cheminée et qu'on tient plus ou moins ouvert suivant le besoin, pendant la marche.

616. On emploie aussi quelquefois des trappes glissantes horizontales; mais, dans les grands appareils, on se sert du registre (*fig.* 75) ou de plaques qui se meuvent verticalement et qui sont soutenues par un contre-poids. La figure 76 est une coupe, suivant la longueur du canal, de cette disposition. R est une plaque de fonte qui glisse dans une coulisse également en fonte fixée dans la maçonnerie ; elle est soutenue par une chaîne qui s'enroule sur une poulie P et se termine par un contre-poids M.

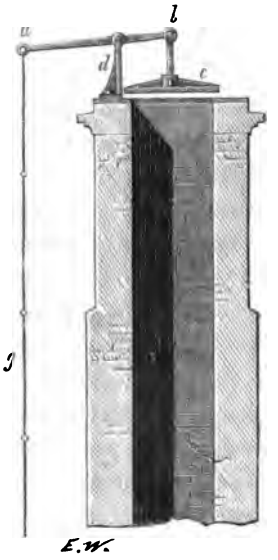


Fig. 77.

617. Cette dernière disposition est généralement employée ; elle a cependant un grand inconvénient, provenant de ce qu'il existe toujours un intervalle assez considérable, entre les bords de la plaque et les rainures du cadre en fonte dans lequel elle se meut; d'où il résulte qu'une grande quantité

d'air froid est appelée dans la cheminée, et diminue d'une manière notable le tirage du foyer. On pourrait éviter l'appel direct de l'air extérieur autour du registre quand il est abaissé, en plaçant à sa partie supérieure des appendices qui plongeraient dans une rainure pleine de sable.

618. Quand la température de l'air chaud dépasse 500° à 600°, on en peut pas employer les appareils que nous venons de décrire, parce que la fonte et le fer seraient trop promptement déformés ou oxydés. La meilleure méthode de régler le tirage de la cheminée est alors de placer la plaque mobile à l'orifice supérieur de la cheminée; parce que la plaque, étant toujours refroidie d'un côté par l'air, s'échauffe moins. La figure 77 représente cette disposition : *c* est une plaque de fonte soutenue par une tige verticale, articulée à l'extrémité du levier *ab*, mobile autour du point *d;* l'extrémité *a* reçoit une chaîne *g*, au moyen de laquelle on règle la distance de la plaque à l'orifice de la cheminée. Cette disposition a l'inconvénient d'exiger qu'un ouvrier monte au sommet de la cheminée quand l'appareil vient à se déranger.

Cheminées d'habitation.

619. Les dimensions des cheminées d'habitation ont été fixées par deux ordonnances de 1712 et de 1723. Elles étaient dans œuvre, pour les appartements, de 3 pieds de largeur sur 10 pouces de profondeur; et pour les cuisines des grandes maisons, de 4 pieds et demi à 5 pieds, sur 10 pouces de large. Elles devaient être construites en briques, avec des fantons en fer de distance en distance.

620. Ces dimensions excessives avaient de grands inconvénients; car, indépendamment de la place inutilement occupée par le tuyau de cheminée, la grande section du canal et sa forme aplatie étaient très-favorables à l'établissement des doubles courants, et par suite à l'introduction de la fumée dans les pièces. Depuis, on y a remédié en rétrécissant la cheminée aux deux extrémités ou dans une partie de leur longueur. Ainsi, sous ce rapport, les ordonnances ne sont point exécutées; elles ne le sont pas davantage sous celui de la construction, car la plupart de ces cheminées étaient en plâtre. Elles sont donc complétement tombées en désuétude. Dans une ordonnance de police du 11 décembre 1852, intitulée Ordonnance contre les incendies, on trouve les conditions actuellement imposées pour la construction des cheminées et autres appareils de chauffage;

cette ordonnance rappelle que chaque foyer doit avoir un tuyau particulier s'élevant sur toute la hauteur du bâtiment. Une nouvelle ordonnance de 1875 rappelle les principales dispositions de la précédente.

621. Quand on compare les dimensions des tuyaux de poêle avec celles des tuyaux de cheminée, et qu'on remarque que dans les gros poêles, on brûle souvent beaucoup plus de combustible que dans les cheminées, on est étonné qu'on ait laissé si longtemps entre eux une si grande disproportion. A la vérité, pour la même quantité de combustible à brûler dans le même temps, les tuyaux de cheminée doivent être plus grands que ceux des poêles, parce que, par la disposition des foyers, les cheminées appellent un grand volume d'air qui n'alimente pas la combustion ; mais, en ayant égard à cette circonstance, la disproportion est encore énorme. L'habitude prise de faire ramoner les cheminées par des enfants qui les parcourent dans toute leur longueur, est probablement la cause qui a fait conserver aux cheminées des dimensions inutiles ; mais, comme on peut facilement employer des moyens beaucoup plus simples pour ramoner les cheminées, il est très-avantageux de ne leur donner que les dimensions seulement suffisantes au dégagement de la fumée et à la ventilation. La forme circulaire est toujours préférable à toutes les autres, parce que la résistance étant uniforme sur toute la surface intérieure, les doubles courants s'y établissent beaucoup moins facilement que dans les tuyaux carrés, et surtout dans ceux dont la largeur dépasse beaucoup la profondeur ; dans ces derniers les résistances étant plus grandes dans les bouts, les courants descendants ont une grande facilité à se former. On a reconnu par expérience que, pour une cheminée d'appartement ordinaire, un tuyau circulaire de 15 à 20 centimètres de diamètre ou de toute autre forme ayant 3 à 4 décimètres de surface, était presque toujours suffisant.

622. Le plâtre est peut-être, de tous les matériaux qu'on peut employer pour la construction des cheminées, celui qui présente les plus graves inconvénients ; car il est attaqué par l'eau qu'entraîne la fumée et par celle qui tombe de l'atmosphère ; la chaleur lui fait éprouver un commencement de calcination qui détruit insensiblement l'adhérence de ses parties, et les variations de température occasionnent souvent des fentes par lesquelles la fumée peut se dégager.

On a été conduit à construire des cheminées d'habitation en

plâtre, non-seulement parce que leur établissement coûtait moins qu'avec les briques, mais encore parce que le dévoiement des cheminées s'exécutait beaucoup plus facilement, et sans l'emploi d'armatures en fer.

L'usage du plâtre doit être proscrit dans la construction des cheminées ; du moins il ne doit être employé que pour lier entre eux des matériaux plus résistants.

623. Les tuyaux de fonte, employés pour les conduites de fumée, ont aussi de graves inconvénients quand ils sont engagés dans la maçonnerie, à cause des dilatations et des contractions qui résultent des changements de température. On ne peut les employer utilement que pour des cheminées qui sont isolées ou adossées aux murs extérieurs.

Les tuyaux de poterie ordinaire sont trop minces et trop fragiles pour constituer des gaînes de cheminée à l'intérieur des maisons, même par simple application contre les murs. Ils ne sont tolérables que pour les conduits extérieurs.

624. Il est un autre genre de poterie, qui est fort employé, parce qu'il sert à former des cheminées contre les murs mitoyens ; on sait qu'il est interdit de faire ce genre de cheminée dans l'épaisseur du mur ; mais on peut appliquer contre lui des gaînes de cheminée qui n'y pénètrent pas. Sans cette possibilité, un grand nombre de pièces seraient privées de cheminées dans les maisons d'une grande ville. Mais ces cheminées doivent être construites avec des soins que l'on néglige trop souvent de prendre. Les poteries qui servent à les construire sont les boisseaux cannelés, dits Gourlier ; ces boisseaux sont de courts tuyaux de $0^m,33$ de hauteur, s'emboîtant les uns dans les autres, à section rectangulaire dont les angles sont arrondis ; ils sont cannelés dans le sens de leur hauteur, afin de donner plus de prise au renformis en plâtre qui les recouvrira. Ils ont une emboiture qui devrait permettre de faire pénétrer ces tuyaux les uns dans les autres sur une petite partie de leur hauteur, afin d'en former pour ainsi dire un tuyau continu. Mais la fabrication n'en est pas assez soignée pour que l'emboitage puisse toujours s'opérer ; le maçon, quand cela arrive, casse le tenon et le joint se trouve uniquement exécuté par le hourdis en plâtre, qui du reste doit toujours être fait. Les dimensions des boisseaux les plus usités sont de $0^m,19$ de largeur sur $0^m,22$ de longueur dans œuvre ; de $0^m,16$ sur $0^m,25$ et de $0^m,22$ sur $0^m,25$; la hauteur de tous les modèles est de $0^m,33$. L'épaisseur est d'environ $0^m,025$, suivant la qualité des

terres et le degré de cuisson. On n'emploie pas souvent à la fabrication de ces boisseaux de la terre à briques de bonne qualité, capable de résister au feu. Pour ce motif, et pour d'autres, provenant de la construction même, le feu fait ordinairement éclater un certain nombre ou même la plus grande partie de ces boisseaux dans une cheminée, qu'il faut ensuite rétablir à neuf du haut en bas de la maison.

Ces gaînes, dont le nombre va croissant d'étage en étage, sont dissimulées à la vue par un renformis en plâtre qui a l'aspect d'un coffre à section rectangulaire, et que l'on approprie au chambranle de la cheminée.

625. Les meilleurs matériaux pour les cheminées sont les briques ; et la manière la plus convenable de les disposer est celle qui a été imaginée par M. Gourlier : elle a été d'abord adoptée dans la construction du palais de la Bourse, et elle est maintenant généralement employée. Dans cette disposition, les gaînes des cheminées sont placées dans les murs de refend dont elles n'augmentent pas l'épaisseur et dont elles ne diminuent pas la solidité ; elles sont construites avec des briques plus épaisses que les briques ordinaires, et qui ont des formes appropriées à la forme et aux dimensions du canal

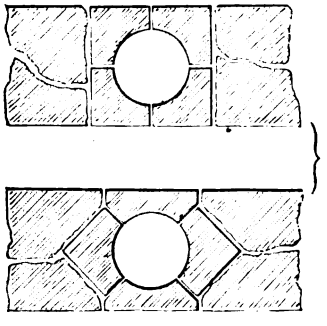


Fig. 78.

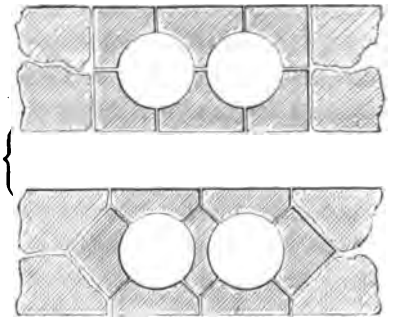


Fig. 79.

qu'elles doivent former. Les figures 78 et 79 représentent deux assises consécutives de briques destinées à former un ou deux tuyaux de cheminée. La différence entre les formes des briques de deux assises qui se suivent, résulte de la nécessité de ne pas placer les joints des briques les uns sur les autres. Ce mode de construction présente une grande solidité, mais il a l'inconvénient d'exiger un grand nombre de modèles de briques, non-seulement en raison des

différents diamètres des cheminées et du nombre des tuyaux groupés, mais pour chaque grandeur et chaque groupement.

On a facilité la construction de ce genre de gaîne pour les cheminées placées dans l'épaisseur des murs par l'emploi d'un modèle à section rectangulaire, dits wagons, dont une face verticale est évidée et dont la face opposée présente une saillie qui s'emboîte exactement dans l'évidement, ce qui permet de juxtaposer plusieurs gaînes à côté les unes des autres, comme cela est nécessaire dans une maison à plusieurs étages ; chaque brique a en largeur hors œuvre toute l'épaisseur du mur ; chaque assise se compose d'une seule brique, de sorte qu'il n'y a pas de joints dans le sens vertical; l'épaisseur de ces briques est de $0^{m},16$.

626. Ces cheminées ne peuvent pas se ramoner par les procédés ordinaires; mais cette opération s'exécute bien plus facilement au moyen d'un fagot ou hérisson formé de lames minces de tôle auquel on attache deux cordes de la longueur du canal, et au moyen desquelles on le promène facilement dans toute son étendue. Le mode de construction dont nous venons de parler est maintenant généralement adopté à Paris.

Le ramonage au hérisson, le seul possible avec les cheminées actuellement en usage, exige que la gaîne en poterie descende jusqu'à la tablette de la cheminée, ou du moins jusqu'à une distance de l'âtre telle que le ramoneur puisse nettoyer à la main les goussets qui raccordent le foyer avec la gaîne. Comme les feux de cheminée proviennent toujours de l'inflammation des suies accumulées à la partie inférieure des gaînes, on comprend la nécessité de ne point terminer celles-ci par un espace d'une plus grande section que le leur, ou d'une autre forme, dont les parois se trouveraient, par cela même, à l'abri du contact du hérisson, et d'un autre côté seraient inaccessibles au ramoneur, à cause de sa distance à l'âtre. Certains constructeurs ont arrêté leurs gaînes de cheminées adossées, construites en boisseaux (624) au plafond de l'étage auquel appartient la cheminée, et ils les ont continuées par un coffre étroit en plâtre, à section rectangulaire, beaucoup plus large près du foyer qu'à la jonction avec la poterie; ils ont formé ainsi un réceptacle pour la suie, qu'il devient impossible d'enlever, précisément dans la partie où le ramonage devrait être fait avec le plus de soin.

627. On a proposé, et cette disposition a été adoptée, dans quelques-unes des maisons nouvelles de Paris, d'avoir une cheminée unique dans laquelle les cheminées de chaque étage viennent aboutir

par un branchement muni d'une clef. Il faut toujours plusieurs de ces cheminées de fond en comble dans une maison. Si les branchements sont courts et d'un nettoyage facile, si les clefs ferment bien, ce système peut fonctionner sans inconvénient. Toutefois il est encore en dehors des prescriptions de police pour l'établissement des cheminées.

CHAPITRE VI.

Influence de l'état de l'atmosphère sur le tirage des cheminées.

Influence des vents.

Les vents ont, comme tout le monde le sait, une très-grande influence sur le tirage des cheminées; leur action se manifeste souvent, et à l'orifice d'écoulement de l'air chaud, et à l'entrée de l'air froid, c'est-à-dire au sommet de la cheminée et à l'ouverture du cendrier ou du canal d'alimentation; c'est pourquoi nous examinerons successivement l'influence des vents aux deux extrémités du canal.

628. *Influence des vents au sommet de la cheminée.* — Pour étudier complétement cette question qui est importante, surtout quand le tirage est très-faible, il faut considérer l'influence du vent dans toutes les directions possibles.

629. Supposons d'abord que le vent soit perpendiculaire à la direction de la cheminée, et par conséquent qu'il soit horizontal. Dans ce cas, il résulte de l'observation que la dépense n'est pas sensiblement changée; or, comme la veine est fortement inclinée, il faut nécessairement que l'augmentation de la vitesse d'écoulement compense la diminution de la section. On peut se rendre compte de cet effet en observant que la veine qui s'écoule possède une vitesse résultant de la vitesse verticale due à la cheminée, et de la vitesse horizontale du vent; on trouve alors qu'il y a compensation exacte. En effet, si *ab* (*fig.* 80) représente la vitesse de la fumée quand le vent n'agit pas, et *ac* la vitesse du vent, *ad* sera la vitesse et la direction de la veine. Si on abaisse *pq* perpendiculairement

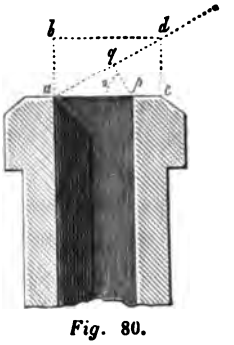


Fig. 80.

sur *ad*, les deux lignes *ap* et *pq* seront proportionnelles à la section de la cheminée et à la section de la veine inclinée, et comme les triangles *abd*, *apq* sont semblables, on en conclut $ap \times ab = ad \times pq$, d'où il suit que les dépenses sont les mêmes dans les deux cas.

630. Quand le vent est dirigé verticalement de haut en bas, l'effet produit dépend de la vitesse du vent et de celle que l'air brûlé pourrait prendre s'il n'y avait pas de résistance. Ainsi, pour qu'un vent dirigé de haut en bas empêchât la fumée de s'écouler, il ne suffirait pas que la vitesse du vent fût égale à celle de la fumée; il faudrait que sa vitesse fût égale à celle que la fumée prendrait si elle n'éprouvait point de résistance. En effet, si on suppose que la vitesse du vent augmente progressivement, la vitesse d'écoulement diminuant, les résistances diminueront, et la pression au sommet de la cheminée ira en augmentant. Si l'équilibre était établi, la pression de l'air brûlé, de bas en haut, serait égale à la charge théorique; et c'est la vitesse correspondante que devrait avoir le vent, pour que l'écoulement de l'air brûlé cessât complétement.

Dans les grandes cheminées d'usine de 30 mètres de hauteur, renfermant de l'air à 300°, la vitesse d'écoulement due à l'excès de pression est à peu près de 18 mètres, et la vitesse réelle à peu près de 3 mètres; une vitesse du vent de haut en bas de 18 mètres serait nécessaire pour détruire le tirage.

631. Mais si on suppose que le vent soit dirigé de bas en haut, son influence sur la vitesse du dégagement de la fumée sera nulle toutes les fois que sa vitesse sera égale ou inférieure à celle de la fumée; dans le cas contraire, elle sera toujours favorable; le vent accélérera la vitesse d'écoulement de la fumée. La cause de cette influence du vent dirigé de bas en haut est facile à reconnaître; en effet, tout courant de gaz tend à entraîner l'air qui l'entoure et à lui communiquer sa propre vitesse. Si donc la vitesse du courant d'air ascendant est plus grande que celle de la fumée, elle augmentera le tirage.

632. Les courants d'air ont rarement les directions que nous venons d'examiner, car ils ne sont presque jamais horizontaux ou verticaux; ils ont toujours une inclinaison plus ou moins grande à l'horizon; mais on peut facilement ramener ce cas général à ceux que nous avons examinés d'abord; car on peut considérer un courant incliné comme résultant de deux courants, l'un horizontal et l'autre vertical, et on peut facilement conclure de ce qui précède que l'influence du vent pourra être favorable quand il tendra à

s'élever, et qu'il sera toujours défavorable dans le cas contraire.

Les vents ayant, en général, des directions peu inclinées à l'horizon, leur influence est très-petite sur les cheminées élevées et isolées ; mais il n'en est plus ainsi lorsque les cheminées dépassent peu les toits des bâtiments, et quand elles sont dominées par des édifices ou des montagnes, parce que les courants d'air prennent la direction des surfaces qu'ils rencontrent, et ils peuvent avoir alors des directions très-inclinées à l'horizon, ou dans un sens, ou dans l'autre. Les courants d'air qui rencontrent des surfaces immobiles en suivent la direction et ne se réfléchissent pas, et on peut facilement en faire l'expérience en dirigeant le vent d'un soufflet obliquement contre une surface plane : le courant prend la direction de la surface. Si le courant est lancé contre un cylindre perpendiculairement à sa direction, et de manière que l'axe de la veine d'air et celui du cylindre soient dans un même plan, la veine d'air se divise en deux parties qui suivent les contours du cylindre et qui se réunissent sur le point du cylindre, opposé à celui qui reçoit le choc de la veine.

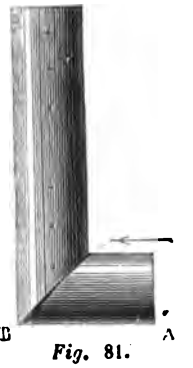


Fig. 81.

633. Il résulte de ce qui précède que la diminution de tirage des cheminées, occasionnée par les vents, est d'autant plus grande que ce tirage est plus petit, que la vitesse du vent est plus considérable, et que sa direction est plus inclinée à l'horizon de haut en bas (1).

634. *Influence du vent sur les foyers.* — Considérons le canal courbé à angle droit ABC (*fig.* 81), qui représente la disposition d'un foyer ordinaire avec sa cheminée. A est l'ouverture par laquelle entre l'air froid qui doit alimenter la combustion ; C'est celle de l'écoulement de la fumée.

(1) *Vitesse des vents.*

0m,5	(par seconde)	vent	à peine sensible.
1	—	—	sensible.
2	—	—	modéré.
5,5	—	—	assez fort.
10	—	—	fort.
20	—	—	très-fort.
22,5	—	—	tempête.
27	—	—	grande tempête.
36	—	—	ouragan.
45	—	—	ouragan qui déracine les arbres et renverse les édifices.

Si nous supposons le canal rempli d'air froid à la température ordinaire, et un vent horizontal perpendiculaire à la direction du tuyau ABC, il est évident que l'air renfermé dans le canal n'éprouvera aucun mouvement. Mais, si le courant est parallèle au tuyau AB, il déterminera un écoulement d'air par le canal ABC, dans le sens du mouvement de l'air extérieur ; c'est-à-dire que, si le vent est dans la direction BA, l'air s'introduira par C et sortira en B ; et, si le vent est dirigé suivant AB, le courant entrera par A pour sortir en C.

Suppósons maintenant que le canal soit rempli d'air chaud qui s'écoule par l'orifice C avec une certaine vitesse ; il est évident que, si le vent est dirigé suivant AB, et que sa vitesse soit plus grande que celle du courant d'air chaud, la vitesse de ce dernier sera accélérée ; et qu'au contraire, si le vent se meut dans la direction BA, le courant d'air chaud sera toujours diminué. Ainsi, dans un appareil disposé comme l'indique la figure, le vent, soufflant dans la direction AB, active le tirage, et le diminue lorsqu'il est dirigé en sens contraire. C'est un phénomène que j'ai eu très-souvent l'occasion d'observer. Toutes les fois que le vent est dirigé en sens contraire du mouvement de l'air extérieur vers les foyers, il y a toujours ralentissement du tirage.

Influence de la température de l'air extérieur.

635. Quand la température de l'air brûlé dans une cheminée reste constante, et que la température extérieure s'élève ou s'abaisse, le tirage diminue ou augmente. Mais l'influence de ces variations se fait sentir principalement sur les phénomènes qui se produisent dans le foyer. La combustion est d'autant plus active, il y a d'autant moins d'air qui échappe à la combustion que l'air a une plus grande densité, et en outre, pour brûler la même quantité de combustible, il faut un moindre volume d'air froid que d'air chaud. Ainsi, tout concourt à rendre le tirage des cheminées plus grand dans l'hiver que dans toute autre saison. On a cependant reconnu, comme nous le verrons plus tard, que, dans les hauts fourneaux, il y a un grand avantage à employer de l'air chaud au lieu d'air froid ; mais les circonstances sont très-différentes de celles des foyers ordinaires : l'air est injecté très-chaud sur le combustible avec une grande vitesse.

Influence de la pression de l'atmosphère.

636. En supposant l'air brûlé à la même température dans la cheminée, lorsque l'air extérieur est à différentes pressions, la vitesse d'écoulement resterait la même, quelle que fût la pression extérieure, si la combustion restait la même ; seulement, le poids de l'air appelé diminuant avec la pression dans le même appareil, on brûlerait des quantités de combustible qui varieraient proportionnellement à la pression extérieure. Mais l'influence des variations du baromètre se manifeste principalement dans les foyers ; la combustion est d'autant moins vive, il s'échappe d'autant plus d'air sans altération que la pression extérieure est plus faible. Cette influence est si grande que, quand la pression est réduite aux 3/4 de la pression ordinaire, la combustion devient assez languissante pour que la chaleur qu'elle dégage ne suffise plus pour la maintenir. Sur le mont Blanc, où le baromètre ne s'élève qu'à $0^m,57$, M. de Saussure a observé que la combustion du charbon ne pouvait se maintenir qu'en l'alimentant avec un soufflet.

Influence de l'état hygrométrique de l'air.

637. Comme les variations de pression et de température extérieure, la variation de l'état hygormétrique de l'air est sans influence sensible sur la vitesse d'écoulement de l'air brûlé, et le tirage ne devrait éprouver qu'une légère diminution par l'accroissement de l'humidité de l'air, si cette humidité ne modifiait la combustion. Mais encore ici, comme dans les deux cas déjà examinés, l'effet produit sur le foyer l'emporte beaucoup sur le premier. A mesure que la quantité de vapeur d'eau en dissolution dans l'air augmente, une plus grande quantité d'air échappe à la combustion, les foyers languissent, et l'effet utile du combustible diminue.

638. On voit, d'après cela, que dans les temps lourds, et qu'on devrait désigner par l'épithète contraire, où l'on trouve à la fois une faible pression, une température élevée et de l'air presque saturé de vapeur d'eau, le tirage des cheminées doit être beaucoup plus faible que dans les temps froids et secs, et qui sont toujours accompagnés d'une grande hauteur de la colonne barométrique.

C'est aussi ce qu'on observe dans toutes les usines : les foyers languissent dans les temps chauds et humides. L'influence est alors la même sur les appareils de combustion et sur l'organe de la respi-

ration, et il doit en être ainsi, car les phénomènes qui se produisent ont la plus grande analogie. L'effet produit sur les foyers est alors tel, que, dans la plupart des verreries, on est obligé de suspendre le travail pendant l'été, et qu'il en est de même dans d'autres usines où l'on n'a pas le moyen de produire l'excès de tirage que les circonstances atmosphériques exigeraient.

639. Il y a cependant, relativement à l'influence de l'humidité de l'air, quelques faits qui semblent en opposition avec ce que nous venons de dire. On a introduit de la vapeur avec l'air d'alimentation dans les foyers, et on a remarqué que la combustion devenait alors très-active, et ne ressemblait pas à ces combustions languissantes qui ont lieu par les temps humides. La raison de cette différence me paraît provenir uniquement de ce que, dans les appareils dont il est question, il y a un grand tirage qui compense l'effet résultant du mélange de la vapeur à l'air; car il est bien constaté qu'avec un accroissement convenable de tirage, on peut toujours détruire l'effet provenant des circonstances atmosphériques nuisibles dont nous avons parlé.

Pour montrer l'influence que peuvent avoir sur le tirage les différentes circonstances atmosphériques, nous considérerons deux cas extrêmes des variations du baromètre, du thermomètre et de l'hygromètre à Paris.

Nous supposerons d'abord qu'en hiver la température soit à un moment donné de — 20°, que le baromètre marque $0^m,780$ l'air étant nécessairement presque sec.

En second lieu, nous considérerons une température d'été de 35°, le baromètre étant à $0^m,72$ et la vapeur d'eau dans l'air étant à la pression de $0^m,04$, c'est-à-dire l'air étant presque saturé de vapeur.

Considérons le tirage d'hiver, en appelant Q le poids d'air écoulé en une seconde on aura $Q = vd$; v et d étant, la vitesse et la densité de l'air chaud; pour le tirage d'été on aura $Q' = v'd'$.

Supposons que, en hiver, la différence $t - \theta$ soit de 300°, l'effet de la vapeur d'eau contenue dans l'air en été aura pour effet de diminuer l'excès de température produit par la combustion de 1/20 environ; si nous supposons cet effet se produisant proportionnellement sur les gaz de la cheminée, la différence $t' - \theta$, sera seulement de 285°; on a:

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t-\theta)}{1+at}}, \qquad d = \frac{0,001293}{1+at} \cdot \frac{0,80}{0,76}$$

et :

$$v' = \sqrt{\frac{2gHa(t' - \theta')}{1 + at'}}, \qquad d' = \frac{0{,}01293}{1 + at'} \cdot \frac{0.68 + 0{,}04 \times 0{,}622}{0{,}76},$$

d'où

$$\frac{Q}{Q'} = \sqrt{\frac{(t - \theta)(1 + at')}{(t' - \theta')(1 + at)}} \cdot \frac{1 + at'}{1 + at} \cdot \frac{0{,}80}{0{,}68 + 0{,}04 \times 0{,}622},$$

et faisant

$$\theta = -20, \qquad t = 280 ; \qquad \theta' = 35 \quad \text{et} \quad t' = 320,$$

il vient

$$\frac{Q}{Q'} = 1{,}37.$$

Aussi le rapport du poids d'air appelé dans le même temps en hiver et en été sera 1,37 ; mais si l'on fait attention que l'air d'été est supposé contenir les quatre centièmes de son volume de vapeur d'eau, on voit que l'oxygène utilisable de l'air d'été se trouvera par ce fait réduit de quatre centièmes ; il faudra donc, pour avoir le rapport des poids d'oxygène appelé dans le même temps par les conditions extrêmes d'hiver et d'été, diviser 1,37 par 0,96, ce qui donnera sensiblement 1,43.

Influence des rayons solaires.

640. Lorsque les rayons solaires pénètrent dans une cheminée dont la température est peu élevée, comme, par exemple, dans les tuyaux des cheminées d'appartements, on sait par expérience que la fumée reflue par le foyer. Il est probable que cet effet provient de ce que les corps voisins, principalement les toits, étant fortement échauffés, donnent naissance à des courants d'air chaud dirigés de bas en haut, et par suite à des courants dirigés en sens contraire au-dessus des corps moins échauffés, et par conséquent autour des tuyaux de cheminée. On évite complétement ces effets en recouvrant les tuyaux de cheminée de mitres en terre cuite ou en métal.

CHAPITRE VII.

Appareils destinés à soustraire le tirage des cheminées à l'influence des vents et de la pluie.

Appareils pour le sommet des cheminées.

641. Les appareils qui ont été proposés sont très-nombreux ; nous décrirons seulement les principaux. Ces appareils peuvent se diviser en deux classes, ceux qui sont fixes et ceux qui sont mobiles.

642. *Appareils fixes.* — Dans la plupart des cheminées d'habitations, on se contente de rétrécir l'orifice supérieur de la cheminée, au moyen d'un tuyau conique ; de cette manière on augmente la vitesse d'écoulement de la fumée, et on diminue les chances de son refoulement par les vents. Souvent aussi on place au-dessus de l'orifice d'écoulement deux tuiles inclinées qui le recouvrent complétement, et laissent dégager la fumée dans deux directions opposées horizontales ; les tuiles sont placées de manière à recevoir l'action des vents dominants. Le plus ordinairement, les tuyaux d'écoulement sont surmontés de tuyaux en tôle, terminés par différents appareils désignés sous le nom de *mitres*.

La disposition la plus simple consiste en une feuille de tôle courbée (*fig.* 82) ; on obvie ainsi à l'influence des vents, du moins quand

Fig. 82.

Fig. 83.

Fig. 84.

le cylindre est suffisamment prolongé. On place quelquefois des plaques de tôle verticales de chaque côté du cylindre, et à une distance

convenable (*fig.* 84). La figure 84 représente une autre disposition ; le tuyau est recouvert d'une calotte conique ou sphérique, dont les bords inférieurs sont au-dessous des bords supérieurs du tuyau ; cette disposition est très-efficace.

Les appareils représentés figures 85, 86, 87, 88 détruisent égale-

Fig. 85.

Fig. 86.

ment l'influence des vents, et la vue des figures suffit pour faire comprendre comment ils sont disposés.

643. Millet a imaginé une mitre, qui se compose d'un tambour en tôle fermé à la partie supérieure, communiquant par le bas avec le tuyau à fumée, et portant un grand nombre d'orifices carrés percés de dedans en dehors, et dont les ébarbures forment de petites pyramides tronquées saillantes sur la surface extérieure. Cette mitre, placée sur un tuyau de poêle dans lequel on brûlait de la paille mouillée, et recevant, dans différentes directions, un courant d'air très-

Fig. 87.

Fig. 88.

violent lancé par un ventilateur à force centrifuge, n'a jamais laissé refluer la fumée par la porte du poêle. L'efficacité de cette mitre pro-

vient probablement des remous qui se forment autour des orifices et qui empêchent l'air de pénétrer dans le tambour. Elle devrait être préférée à toutes les autres si elle n'avait un inconvénient grave qui oblige à un fréquent nettoyage : les matières solides entraînées par la fumée forment, dans l'intérieur, des pellicules minces, analogues aux toiles d'araignée, et qui bouchent bientôt les orifices.

On emploie maintenant assez souvent une disposition qui a beaucoup d'analogie avec la mitre de Millet. L'appareil (*fig.* 89) se compose d'un cylindre vertical, fermé à la partie supérieure, percé latéralement d'un grand nombre de fentes parallèles à l'axe, dont les bords verticaux font saillie extérieurement, de manière à former des ajutages convergents, comme dans la mitre de Millet. Le tuyau est quelquefois environné d'un cylindre concentrique ouvert par les deux bouts. La figure 90 représente une coupe transversale par *ab* du tuyau intérieur.

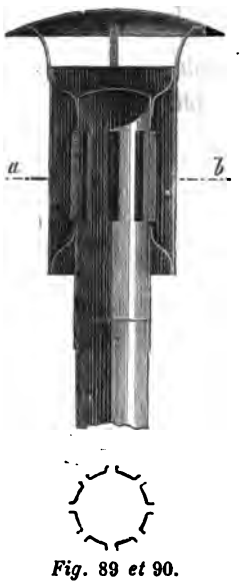


Fig. 89 *et* 90.

Tous les appareils qui surmontent les cheminées sont en tôle ; ils ont le grand inconvénient de s'oxyder rapidement, et de salir les murs extérieurs, par la chute des eaux pluviales qui ont touché leur surface. On obvierait à ce double défaut, en recouvrant les appareils d'un vernis vitreux, qu'on emploie maintenant avec succès pour les enveloppes des calorifères d'appartement, et en général pour les tuyaux de tôles.

644. *Appareils mobiles.* — Examinons maintenant les appareils mobiles. Tous ont pour objet de diriger l'ouverture de sortie du côté opposé au vent, de sorte que la fumée prenne la même direction ; alors non-seulement le vent ne s'oppose pas à la sortie de la fumée, mais, comme nous l'avons vu, il augmente encore le tirage, quand sa vitesse est plus grande que celle de la fumée.

645. L'appareil le plus généralement employé est représenté dans la figure 91. La cheminée se termine par un tuyau cylindrique en tôle, enveloppé par un autre tuyau, mobile autour de son axe, fermé à la partie supérieure et recourbé à angle droit. La partie supérieure du manchon est garnie d'une girouette qui s'appuie sur le tuyau d'écoulement.

On a proposé de faire à ces appareils une modification, qui peut être avantageuse dans certaines positions, et qui est représentée dans la figure 92. Le tuyau d'écoulement est traversé par un tuyau concentrique d'un petit diamètre, d'une moindre longueur, qui se

Fig. 91.

Fig. 92.

termine extérieurement par un entonnoir. Il est évident que l'air, qui pénètre par le tube intérieur, tend à augmenter le tirage, quand la vitesse du vent est plus grande que celle de la fumée.

646. La figure 93 représente une autre disposition également très-efficace. Le tuyau de la cheminée est surmonté d'un cône en tôle, traversé à son sommet par une tige fixe ; un écrou et une embase à la tige maintiennent le cône à une certaine hauteur, et un jeu convenable lui permet de s'appuyer sur une arête quelconque du tuyau de fumée ; enfin, au moyen d'un anneau métallique fixé au-dessus du cône, son centre de gravité se trouve sensiblement au sommet. Il résulte de cette disposition que, quand le vent est dirigé horizontalement, ou qu'il est plus ou moins incliné de haut en bas, il fait osciller le cône et l'écoulement de la fumée a lieu du côté opposé.

Fig. 93.

647. Quand les vents violents qui peuvent avoir de l'influence sur le tirage ont toujours la même direction, on peut employer la dispo-

sition très-simple indiquée par la figure 94, et qui consiste en une plaque métallique mobile autour d'un axe horizontal fixé contre les parois de la cheminée, et qui bascule d'un côté ou de l'autre suivant le sens de la vitesse du vent.

On a aussi proposé d'employer des cages à deux, quatre, six ou huit pans (*fig.* 95) fermées par le haut et portant sur chaque face une ouverture munie d'une porte, à charnière horizontale et supérieure,

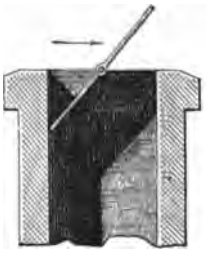


Fig. 94.

Fig. 95.

et d'un contre-poids destiné à placer le centre de gravité de chacune d'elles dans l'axe de rotation ; ces portes étaient reliées, deux à deux, par des tringles articulées de manière que, quand l'une était fermée par le vent, elle ouvrait celle qui lui était opposée.

On s'est encore servi de lanternes à quatre, six et huit faces, percées d'ouvertures garnies de jalousies qu'on pouvait facilement ouvrir et fermer par des tringles communiquant avec le bas de la cheminée.

648. Les appareils mobiles (*fig.* 91, 92) seraient évidemment les meilleurs de tous, si l'on pouvait donner une mobilité parfaite au manchon ; mais, comme le frottement est toujours assez considérable, il arrive quelquefois, lorsque le vent est très-faible, que l'ouverture latérale se trouve dirigée du côté du vent, et que par conséquent la fumée est refoulée dans le foyer. Ce cas peut être d'autant plus fréquent, que dans cette position le vent n'a aucune action sur la girouette. A la vérité, l'équilibre est instable et, pour peu que la girouette soit dérangée, elle abandonne cette position pour ne plus y revenir ; mais on conçoit facilement que les frottements peuvent, pour des vents très-faibles, la maintenir même sous un angle assez grand.

Les appareils (*fig.* 93 et 95) n'ont pas l'inconvénient que nous venons de signaler ; s'ils n'obéissaient pas à l'influence du vent, la fumée ne serait pas nécessairement refoulée, mais ils ne sont efficaces que quand le vent est dirigé horizontalement ou de haut en bas ; s'il était dirigé de bas en haut, par la disposition même des appareils, l'air extérieur pénétrerait dans la cheminée et aurait une influence fâcheuse sur le tirage.

649. En résumé, les appareils mobiles sont toujours compliqués ; leurs diverses articulations arrivent à se rouiller et dès lors fonctionnent mal ; il en résulte que leur efficacité n'est pas assurée dans toutes les circonstances, et on doit toujours leur préférer les appareils fixes. Dans les grandes cheminées d'appel, où l'on a une vitesse qui dépasse rarement 2 mètres par seconde, on se contente de fermer la partie supérieure de la cheminée, et de percer au-dessous un grand nombre d'orifices rectangulaires, dont la somme des surfaces soit égale à deux ou trois fois la section de la cheminée, et jamais on n'a constaté de variation sensible de tirage par l'action des vents.

Ces appareils se construisent toujours en tôle, et par conséquent ils seraient de peu de durée, si on ne prenait pas les précautions nécessaires pour s'opposer à l'oxydation du fer. On a eu recours pour cela à différents moyens. On s'est servi de fer galvanisé ; on a aussi employé comme vernis le goudron, qui résiste bien à l'air et à une température de 200° ; mais le vernis vitreux préserve encore beaucoup mieux les tuyaux de tôle des influences atmosphériques.

650. Il se produit souvent dans les appartements où on ne fait pas de feu une odeur de suie due à un courant d'air descendant dans la cheminée. On obvie ordinairement à cet inconvénient en plaçant au bas de la cheminée une trappe en tôle, à charnière, battant sur un léger châssis en fer ; on la manœuvre à la main. Si cette trappe fermait hermétiquement, elle produirait l'effet voulu ; mais en général cet effet n'est obtenu que d'une façon imparfaite, par suite du mode habituel de construction de la plaque. Quoi qu'il en soit, cette trappe peut être utile en cas de feu de cheminée, car elle permet d'intercepter l'accès de l'air qui alimenterait la combustion de la suie. Il est bon de remarquer que, même lorsqu'on ne fait pas de feu dans une cheminée d'appartement, il s'y produit toujours un courant d'air naturel qui sert à ventiler la pièce d'où part la cheminée ; au point de vue hygiénique, il peut être préférable de souffrir

le léger inconvénient dont nous avons parlé pour laisser la ventilation naturelle s'exercer par la cheminée, surtout dans les chambres à coucher.

Appareils pour les prises d'air.

651. Les vents étant rarement dirigés de bas en haut, si la prise d'air qui alimente le foyer se fait dans un lieu découvert et par un orifice horizontal pratiqué dans le sol et communiquant par un canal avec le foyer, ce dernier ne sera jamais influencé par les vents, quelle que soit leur direction ; et en faisant le canal très-large, de manière que la vitesse de l'air y soit très-petite, les résistances ne diminueraient pas sensiblement le tirage.

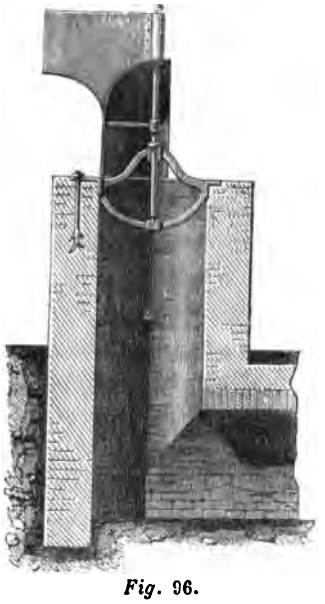


Fig. 96.

652. Dans certaines circonstances, on peut disposer la prise d'air de manière à faire concourir le vent à l'augmentation du tirage. Il suffit évidemment, pour cela, de faire la prise au niveau du sol, et de garnir l'orifice d'une trappe inclinée à 45°, mobile autour de l'orifice de manière à pouvoir l'opposer au vent. J'ai eu plusieurs fois l'occasion d'établir cette disposition dans des appareils dont le tirage était presque anéanti par les vents dirigés en sens contraire du mouvement de l'air dans le foyer, et ils ont toujours complétement réussi.

653. On peut aussi employer le vent pour diriger des appareils analogues à ceux que nous avons décrits pour le sommet des cheminées. L'appareil mobile le plus simple est représenté figure 96. Il consiste en une calotte métallique mobile, portant une girouette disposée de manière que la calotte présente toujours son ouverture au vent, afin qu'il se dirige dans le canal.

CHAPITRE VIII.

Appareils destinés à mesurer le tirage.

654. La connaissance de la température de l'air dans les cheminées peut être importante dans un grand nombre de cas ; dans tous, elle donne une valeur approchée de la perte de chaleur, quand on connaît en même temps la consommation de combustible ou la vitesse d'écoulement ; et, pour les cheminées qui appellent directement l'air extérieur, la résistance que l'air éprouve dans le circuit étant constante, la vitesse d'écoulement est proportionnelle à la racine carrée de l'excès de la température de la cheminée sur l'air extérieur ; par conséquent la vitesse d'écoulement étant connue pour un certain excès de température, on pourra facilement la calculer pour tout autre.

655. Pour observer la température de l'air dans une cheminée, quand cette température est inférieure à 100°, il faudrait se servir d'un thermomètre à eau, dont le réservoir serait formé d'un grand nombre de petits tubes en cuivre ou en fer-blanc, disposés horizontalement autour d'un tube central vertical, qui communiquerait par un tuyau d'un très-petit diamètre avec la tige en verre du thermomètre placé en dehors de la cheminée. L'appareil devrait être gradué en déterminant un certain nombre de points par la comparaison avec un thermomètre à mercure. Cette disposition aurait l'avantage de donner la température moyenne de l'air de la cheminée, et comme le réservoir aurait une grande surface, l'instrument pourrait être rendu très-sensible, relativement au temps qu'il emploierait pour se mettre en équilibre de température avec l'air environnant. Mais cet appareil serait influencé par le rayonnement des parois de la cheminée, de sorte que si la température de l'air venait à baisser brusquement, celle des parois ne diminuant que lentement, l'instrument indiquerait une température plus élevée que celle de l'air. On obvierait à cet inconvénient en formant le réservoir de tubes en métal poli, disposés verticalement sur une partie de leur longueur, et en environnant le faisceau de tubes de plusieurs tuyaux concentriques verticaux, aussi en métal poli et ouverts par les deux bouts. Mais cet appareil, appliqué à une cheminée d'appel, aurait ce grave inconvénient, que le chauffeur serait obligé de se déplacer pour observer ce thermomètre et celui qui serait placé en dehors.

656. La disposition suivante serait bien préférable, parce que l'appareil pourrait être mis à côté du chauffeur, qui pourrait à chaque instant lire sur une échelle l'état de la ventilation, et la régler au moyen du registre d'accès de l'air dans le cendrier du foyer d'appel. De plus, cette disposition n'exigerait pas que la température de l'air de la cheminée fût inférieure à 100°.

L'appareil dont il est question se compose de deux cylindres allongés, en cuivre mince, fermés par les deux bouts, placés verticalement, l'un dans la cheminée, l'autre en dehors ; tous deux sont pleins d'air sous la pression ordinaire, et communiquent par des tubes métalliques d'un très-petit diamètre avec les deux extrémités d'un manomètre à eau, formé de deux tubes de verre parallèles, et placé sous les yeux du chauffeur. Les vases, les tubes et les joints avec les extrémités du manomètre doivent être parfaitement étanches. Tant que l'air de la cheminée sera à la température extérieure, le liquide, dans les deux branches du manomètre, sera à la même hauteur ; mais, si l'air de la cheminée devient plus chaud que l'air extérieur, il y aura une dépression dans la branche du manomètre qui correspond au vase placé dans la cheminée. En supposant que les volumes des vases soient très-grands relativement aux volumes des tubes, et en négligeant la dilatation des vases, les pressions des deux côtés seront représentées par les dilatations que les gaz éprouveraient s'ils étaient libres de se dilater. Ainsi, du côté de la cheminée, la pression sera $P(1 + at)$; de l'autre, elle sera $P(1 + a\theta)$, et la différence qui sera mesurée par le manomètre sera égale à $Pa(t - \theta)$. P représentant la pression atmosphérique estimée en eau, la dépression manométrique sera égale à $10^m,33.0,00365\ (t - \theta) = 0^m,0377\ (t - \theta)$. Ainsi, pour chaque degré de différence, elle sera de $3^c,77$. En supposant que la différence de température pût s'élever jusqu'à 50°, la différence des niveaux serait au plus de $1^m,88$; ainsi le manomètre devrait avoir 2 mètres de hauteur, et le liquide devrait remplir la moitié de chaque branche, quand les pressions sont égales. Si l'on employait un manomètre à mercure, la dépression pour une différence de 1° serait de $0,76.000365 = 0^m,00277$. Pour les différences de 50° au maximum, le manomètre à eau est préférable.

Si, pour une valeur connue de $t - \theta$, on avait déterminé la ventilation par heure, l'échelle pourrait indiquer les ventilations qui correspondent aux indications du thermomètre différentiel ; car ces ventilations sont sensiblement proportionnelles aux racines carrées de

$t - \theta$. Dans tous les cas, la pression normale devant être maintenue, le chauffeur y parviendra facilement en réglant le registre du foyer d'appel, de manière que $t - \theta$ reste sensiblement constant.

Pour que les deux réservoirs d'air prissent rapidement la température de l'air environnant, il serait avantageux de les former d'un faisceau de tubes communiquant entre eux et environnés d'un ou de deux tubes ouverts par les deux bouts, assez éloignés pour que l'air pût se mouvoir facilement dans les intervalles; dans tous les cas, le réservoir extérieur devrait être placé à l'ombre et à l'abri du rayonnement des surfaces échauffées par le soleil.

657. Tout ce que je viens de dire n'est applicable qu'aux cheminées d'appel dans lesquelles l'air extérieur arrive, sans qu'on ait augmenté sa température; dans le cas où l'air appelé se trouve à une température plus élevée, sensiblement constante, comme dans les hôpitaux, les prisons, etc., la ventilation n'est plus proportionnelle à la racine carrée de l'excès de la température de l'air de la cheminée sur la température extérieure; la mesure de la ventilation par les températures devient alors plus compliquée, mais c'est une question sur laquelle je reviendrai en parlant de la ventilation des établissements publics.

658. Si la température de l'air dans la cheminée était voisine de 300°, comme dans la plupart des cheminées des générateurs, la même méthode serait encore applicable à la mesure de l'excès de la température intérieure sur la température extérieure; mais le réservoir d'air chaud devrait être d'un petit diamètre, très-allongé et d'une épaisseur suffisante pour résister à la pression; car, pour une température de 300°, la pression résultant de l'échauffement de l'air est de $2^{at},1$; ce réservoir ne pourrait être ni en fer ni en cuivre, car à cette température ces métaux absorberaient certainement l'oxygène de l'air, et il en résulterait une grave erreur dans les indications. On pourrait employer un réservoir en cuivre argenté ou doré à l'intérieur ou tout simplement un réservoir de verre; ou enfin un réservoir en fer, mais en employant de l'azote au lieu d'air; en outre, le manomètre devrait être à mercure, pour que la course ne fût pas trop grande.

659. On pourrait aussi, pour les températures élevées, inférieures cependant à 360°, employer un thermomètre à mercure ayant un long réservoir en fer placé dans la cheminée, et une tige également en fer placée en dehors; le niveau du mercure serait indiqué par un flotteur. Dans chaque cas particulier, le volume du mercure serait

facile à déterminer : supposons, par exemple, que la tige ait 5 millimètres de diamètre, sa section en décimètres carrés sera de $0^{dc},001962$; si on suppose que la course de l'index soit de 1 mètre pour 300°, l'accroissement de volume du mercure sera de 0,01962. La dilatation absolue du mercure de 0° à 100 étant de 0,0180, celle du fer 0,0012, la dilatation apparente du mercure dans le fer sera de $0,018 - 0,012 = 0,0160$; pour 300°, elle sera de 0,0504, et par suite le volume du réservoir sera de $0,0196 : 0,0504 = 0,38$ en décimètres cubes ; le poids du mercure serait alors de $0,38.13,6 = 5^{k},21$. Le thermomètre à mercure ne conviendrait pas pour de petits excès de température, parce que la course serait trop petite, ou qu'il faudrait employer trop de mercure. Dans tous les cas, le thermomètre à air différentiel me paraît bien préférable sous tous les rapports.

LIVRE IV

MOUVEMENTS DE L'AIR PRODUITS PAR DES MACHINES OU PAR UN JET DE VAPEUR.

CHAPITRE PREMIER.

Considérations générales sur les appareils ventilateurs.

660. L'effet d'une cheminée consiste, comme nous l'avons dit, à appeler, à l'extrémité du canal avec lequel elle communique, un certain volume d'air, à le faire circuler dans le canal, et à le verser plus ou moins altéré et plus ou moins échauffé dans l'atmosphère, par son orifice supérieur. Cet effet, qui résulte de la force ascensionnelle de l'air chaud, et qui exige que l'air, à son entrée dans la cheminée, conserve une température assez élevée, pourrait évidemment être produit par une action mécanique directe, au moyen de pompes, de ventilateurs ou de machines soufflantes quelconques, placés à l'une des extrémités ou en tout autre point du circuit.

661. Les mouvements des gaz, produits par les cheminées, exigent beaucoup de combustible; ainsi, dans les fourneaux des chaudières à vapeur, la dépense, pour l'appel d'air dans le foyer, est environ le quart de la consommation totale de combustible. Si on avait un emploi utile de la chaleur de l'air brûlé, quand il est refroidi à 300°, et si, en même temps, le tirage mécanique coûtait moins que le tirage par la chaleur, il serait avantageux d'employer le premier moyen. Or, dans quelques cas, on peut utiliser la chaleur perdue, et nous allons voir que le tirage mécanique coûte beaucoup moins que le tirage par les cheminées. Je rapporterai d'abord deux expériences qui établissent ce fait d'une manière évidente.

662. Dans un des bains établis sur la Seine, la fumée, après avoir circulé autour de la chaudière à eau chaude, se répartit dans douze tuyaux d'un petit diamètre et de 20 mètres de longueur, ayant en-

semble une section égale à $0^{mq},10$, et plongés dans le réservoir d'eau froide; par cette circulation, la fumée se refroidit à peu près complétement, et à son entrée dans la cheminée elle a sensiblement la température de l'eau du réservoir. A l'extrémité des conduits, se trouve un ventilateur qui aspire la fumée et la jette dans la cheminée. Le tambour du ventilateur a $0^{m},80$ de diamètre, $0^{m},40$ de largeur; le tuyau d'écoulement a $0^{m},20$ de diamètre; les ailes font quarante tours à la minute, et la machine est mise en mouvement par un seul homme. Il résulte de plusieurs expériences que, avec ce travail mécanique, on a brûlé en deux heures $0^{st},44$ de bois pelard, pesant 390 kilog. le stère, ce qui donne 85 kilog. par heure. En admettant que 1 kilog. de bois soit équivalent à $0^{k},5$ de houille, du moins pour la quantité d'air nécessaire à la combustion, ce qui s'éloigne peu de la vérité, le travail d'un homme suffirait à la combustion de 42 kilog. de houille dans les circonstances les plus défavorables, puisque la fumée passait dans des tuyaux d'un petit diamètre et d'une grande longueur. Or, le tirage par la chaleur coûterait au moins $\frac{42k}{4} = 10^{k},5$ de houille, ce qui correspond à la force de 2,5 chevaux-vapeur; mais, comme 1 cheval vaut 7 hommes, il en résulte que le tirage mécanique qui s'effectue par 1 seul homme coûte réellement 17 hommes, quand il est produit par la chaleur de l'air dans une cheminée ordinaire, où la fumée arrive à 300°. Ce tirage se trouve donc effectué avantageusement, malgré le grand accroissement de résistance résultant du frottement de l'air dans les tuyaux plongés dans l'eau, résistance égale à celle que présenterait un tuyau unique de $68^{m},50$ de longueur et de $0^{m},10$ de diamètre, comme il est facile de s'en assurer par un calcul fort simple.

663. Dans la brasserie belge de Louvain, un ventilateur, qui emploie un travail mécanique de 6 chevaux, suffit pour produire l'appel des fourneaux dans lesquels on brûle par heure 1000 kilog. de houille, ce qui est à peu près la consommation d'une machine de 200 chevaux. Ainsi, dans cette usine, le travail de 6 chevaux-vapeur équivaut au travail de l'air chaud dans la cheminée, qui exigerait au moins 250 kilog. de houille, ce qui correspond à 50 chevaux.

D'après ces faits, on ne peut pas douter qu'il n'y ait un grand avantage, au point de vue de l'économie du combustible, à remplacer le tirage à l'air chaud par une action mécanique, malgré l'accroissement de résistance qu'entraîne le refroidissement complet de la fumée.

664. Proposons-nous maintenant de déterminer d'une manière générale le rapport entre le travail produit par l'air chaud qui s'élève dans une cheminée et le travail qu'on pourrait effectuer par la vapeur qui serait engendrée au moyen de la chaleur que renferme la fumée.

On sait qu'un cheval-vapeur consomme au maximum 4 kilog. de houille à l'heure, ou $4 . 8000 = 32000$ unités de chaleur, et par seconde $32000 : 3600 = 8,88$; or, comme le travail d'un cheval-vapeur est de 75 kilogrammètres, 1 kilogrammètre consomme $8,88 : 75 = 0,118$ unités de chaleur. Ceci posé, la quantité de chaleur perdue par une cheminée est $pt : 4$, p représentant le poids de l'air qui s'écoule par seconde, et t l'excès de la température de l'air chaud sur la température extérieure; le nombre de kilogrammètres que cette chaleur pourrait produire sera donc

$$\frac{pt}{4} \cdot \frac{1}{0,118} = \frac{pt}{0,472} = 2,12pt \ldots\ldots\ (1)$$

Le travail produit par une cheminée doit être pris, abstraction faite des résistances, car l'appel de l'air extérieur, de quelque manière qu'il soit produit, aurait à vaincre les mêmes résistances; or, le travail d'une cheminée est égal à

$$\frac{pv^2}{2g} = p . H . a . t \ldots\ldots\ldots\ldots\ (2)$$

v représentant la vitesse de l'air chaud dans la cheminée, et le rapport des expressions (1) et (2), c'est-à-dire du travail qui pourrait être produit avec la chaleur perdue au travail effectif, est égal à

$$\frac{2,12}{Ha}.$$

En prenant $H = 30^m$, ce rapport devient 19. Ainsi, quand on peut refroidir utilement la fumée d'une cheminée, il y a un grand avantage à remplacer le tirage à l'air chaud par un tirage mécanique. A la vérité, le refroidissement de la fumée exige un accroissement dans la longueur du circuit, et la machine de ventilation, quelle qu'en soit la nature, ne rendra jamais tout le travail qui lui sera transmis. Mais ces pertes sont loin d'atteindre le chiffre 19 que nous avons obtenu par les considérations précédentes.

665. Dans le calcul que nous venons de faire, nous avons supposé que la machine à vapeur consommait 4 kilog. de houille par cheval et par heure; mais la plupart de celles qu'on construit consomment

beaucoup moins ; l'avantage du tirage mécanique serait alors beaucoup plus grand. J'ajouterai que, lorsqu'on se sert de machines à haute pression à détente, sans condensation, et qu'on a l'emploi utile de la vapeur détendue, le travail de la machine ne coûte réellement que la différence entre les quantités de chaleur renfermées dans la vapeur comprimée et dans la vapeur détendue, ce qui est fort peu de chose ; car, d'après M. Regnault, les chaleurs totales de la vapeur à 5 atmosphères et à 1 atmosphère sont de 653 et 637 calories, et par conséquent la chaleur perdue dans la machine n'est à peu près que les 4 centièmes de celle qu'avait observée la vapeur par sa formation.

On doit observer, d'après la formule qui fournit le rapport de l'effet utile produit par une force motrice à celui qui résulte de l'emploi d'une cheminée, que ce rapport est d'autant plus faible que la cheminée est plus élevée. Or, nous avons vu qu'il n'est pas avantageux d'élever les cheminées au delà de 30^m environ ; d'un autre côté le rendement des appareils destinés à obtenir le travail mécanique n'est pas intégral, et pour le cas des ventilateurs, par exemple, il peut varier de 50 à 15 pour 100 et même s'abaisser à 10 pour 100 pour les appareils de faible dimension et marchant à une vitesse faible. Dans ce dernier cas, le plus défavorable, l'effet utile du ventilateur serait encore double de celui de la cheminée, en supposant toujours qu'il faille 4 kilogrammes de houille par cheval-vapeur.

666. On trouve dans la *Revue universelle de M. de Cuyper* l'extrait d'un rapport de M. Jules Havrez au ministre des travaux publics de Belgique sur l'exploitation de la houille en Angleterre. Ce rapport contient quelques indications sur la ventilation par foyers, qui confirment ce que nous venons de dire.

Dans la mine de Helton, Bassin de Durham, trois cheminées d'appel évacuent des volumes d'air qui sont respectivement par seconde.

47^{m3} 75^{m3} $79^{m3},2.$

La température de l'air évacué est :

166° 111° 139°.

La dépression au bas de la cheminée est en eau :

25^{mm} 50^{mm} $37^{mm}.$

On a trouvé que dans chacun de ces cas le rapport de la chaleur

produite à la chaleur utile est représentée par les nombres suivants :

94 49 69

On voit donc qu'on n'utilise pour l'aérage qu'une très-petite portion de l'échauffement de l'air.

L'auteur arrive à cette conclusion qui se déduit immédiatement de notre formule, que l'effet utile est d'autant plus considérable que le puits d'appel est plus profond.

M. Hariez conclut que l'aérage par foyer ne peut convenir que dans le cas de puits très-profonds et de conduits d'appel à grande section ; pour produire à l'aide des foyers d'appel un effet utile égal à celui des ventilateurs, on trouve qu'il faudrait des puits ayant 585 mètres de profondeur.

667. Il faut de plus remarquer que l'avantage des appareils mécaniques n'est aussi considérable qu'autant que le travail est produit par la vapeur; il serait beaucoup plus petit s'il était produit par des hommes. En effet, le travail d'un cheval-vapeur coûte 4 kilog. de houille par heure, ou 40 kilog. dans 10 heures, ou au plus 2 francs au prix de la houille à Paris; et comme un cheval-vapeur équivaut à 7 hommes, il s'ensuit que le travail d'un homme-vapeur coûte, pendant 10 heures, environ 30 centimes, tandis que la journée d'un manœuvre est de 2 francs. Mais comme il faudrait nécessairement 2 hommes, attendu qu'un seul ne pourrait pas soutenir sans interruption le même travail pendant dix heures, il faudrait estimer le travail en argent au moins à 4 francs, et par conséquent, le travail par des hommes coûterait au moins 14 fois plus que la vapeur. D'après les nombres précédents le travail d'un homme coûterait autant que celui de 2 chevaux-vapeur, du moins à Paris.

La machine devrait avoir évidemment, outre la puissance suffisante pour suppléer à la cheminée, celle qui serait nécessaire pour vaincre les frottements dans l'appareil où la chaleur devrait être utilisée. Dans tous les cas qui pourront se présenter, il sera facile de déterminer le travail qu'elle doit effectuer, en partant des lois et des formules données dans le livre II.

668. Les machines employées pour produire des mouvements d'air sont très-nombreuses; je décrirai seulement celles dont l'usage est le plus général, en indiquant autant que possible les résultats obtenus sous le rapport de leur effet utile. A la rigueur, l'étude de ces machines semble étrangère à cet ouvrage; mais comme on a souvent

à discuter les avantages et les inconvénients, sous différents rapports, de l'emploi de la chaleur et des machines pour produire la ventilation, l'examen des appareils mécaniques destinés à produire des mouvements d'air se rattache intimement à l'étude de la chaleur.

Avant de passer à la description des appareils, j'insisterai d'abord sur un principe général, applicable à tous et qui a une grande influence sur l'effet utile produit. Le principe dont je veux parler est relatif à la section du canal sur laquelle agit l'appareil.

669. Considérons, par exemple, un long canal d'un diamètre D, par lequel on veut appeler un certain volume d'air extérieur, au moyen d'une machine qui agit sur un orifice ayant un diamètre D dans une première disposition et d dans une seconde; tout se passera, relativement au travail dépensé, comme si l'air était comprimé à l'origine de la conduite par une charge en air, représentée par P dans le premier cas et P_1 dans le second, du moins en négligeant les variations de densité de l'air comprimé ou dilaté, ce qui est possible quand les vitesses ne correspondent qu'à des charges de quelques centimètres d'eau. En désignant par p et p_1, les charges correspondantes aux vitesses d'écoulement à l'extrémité de la conduite, par Q et Q_1, les volumes d'air écoulés par seconde, et par R la somme des résistances que présente la conduite, on aura dans le premier cas

$$P - p = Rp; \quad p = \frac{P}{1+R}; \quad \text{et} \quad Q = \frac{\pi D^2}{4}\sqrt{\frac{2gP}{1+R}};$$

et dans le second cas

$$P_1 - p_1 = Rp_1 \cdot \frac{d^4}{D^4}; \quad p_1 = \frac{P_1}{1+R\frac{d^4}{D^4}}; \quad \text{et} \quad Q_1 = \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{\frac{2gP_1}{1+R\frac{d^4}{D^4}}}.$$

Et comme les volumes doivent être égaux, on aura

$$\frac{D^4 \cdot P}{1+R} = \frac{d^4 P_1}{1+R\frac{d^4}{D^3}}; \quad \text{d'où} \quad P_1 = P\frac{D^3}{d^4}\cdot\frac{1+R\frac{d^4}{D^4}}{1+R}.$$

670. On voit, à l'inspection de la dernière formule, que la valeur de P_1, augmente rapidement à mesure que d diminue, et comme le travail est égal au produit de la charge par le poids de l'air écoulé dans une seconde, il s'ensuit que le travail dépensé est proportionnel

à P_1. Si, par exemple, on avait $R = 10$, $D = 2^m$, $d = 0^m,5$, on trouverait

$$P_1 = p \cdot 256 \frac{4 + 10 \cdot 0,0039}{11} = P \cdot 256 \cdot 0,094 = P \cdot 24,06.$$

671. Il est important de remarquer que cet accroissement de charge, et, par suite, de travail, aura lieu également pour une cheminée et pour une machine quelconque.

672. Si l'orifice, sur lequel agit la machine ou la cheminée, avait une plus grande section que le tuyau d'appel, en négligeant la détente résultant de l'accroissement de section et en conservant les mêmes notations, on aurait

$$P_1 - p_1 = R \frac{d^4}{D^4} p_1 + p_1 \left(\frac{d^4}{D^4} - 1\right); \qquad p_1 = \frac{P_1}{(1 + R)\frac{d^4}{D^4}},$$

$$Q_1 = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gP_1}{(1 + R)\frac{d^4}{D^4}}},$$

et par suite $P_1 = P$. Ainsi on ne gagnerait rien à augmenter la section, du moins en n'ayant pas égard à la détente qui se produit par suite de l'accroissement de section ; mais cette détente occasionnerait, dans certaines circonstances, un accroissement notable de charge et ne pourrait pas être négligée.

673. Si la machine était soufflante au lieu d'être aspirante, les phénomènes produits par les variations de section de l'orifice sur lequel elle agirait seraient les mêmes. Si la machine était à la fois aspirante et soufflante, on pourrait assimiler l'effet produit à celui d'une machine soufflante placée à l'extrémité du canal, et la diminution ou l'accroissement de section des orifices d'entrée et de sortie de l'air dans la machine aux effets produits par des étranglements dans le canal, circonstance qui occasionne toujours une certaine perte de charge. Ainsi, en général, il importe beaucoup de conserver au canal d'écoulement de l'air une section constante.

CHAPITRE II

Ventilateurs à force centrifuge.

674. Considérons un tambour fixe, fermé de toutes parts, dont l'axe de figure soit occupé par un arbre mobile, portant plusieurs ailes planes ou courbes, qui, dans leur mouvement de rotation, parcourent la capacité intérieure du tambour. Par le mouvement des ailes, l'air sera mis lui-même en mouvement; et, par l'effet de la force centrifuge, il sera comprimé à la circonférence et dilaté au centre. Mais si les deux joues du tambour sont percées à leur centre d'un orifice, et si la circonférence du tambour est ouverte, l'air sera aspiré par le centre et rejeté à la circonférence. On conçoit, dès lors, que, si les orifices des joues ou la circonférence du tambour communiquaient avec un tuyau, ou si ces deux communications avaient lieu en même temps, l'air serait aspiré ou poussé dans le tuyau, ou en même temps aspiré dans l'un et poussé dans l'autre.

675. Quoique tous les ventilateurs soient à la fois aspirants et soufflants, nous désignerons spécialement, sous le nom de *ventilateurs aspirants*, ceux qui aspirent l'air par des tuyaux de conduite et le jettent dans l'espace environnant par tous les points de la circonférence du tambour; sous celui de *ventilateurs soufflants*, ceux qui aspirent directement l'air environnant pour le faire écouler par un tuyau qui communique avec la circonférence du tambour; et sous celui de *ventilateurs aspirants et soufflants*, ceux qui appellent l'air par des tuyaux de conduite plus ou moins longs et le versent dans un canal, comme les ventilateurs souflants.

Ventilateurs aspirants.

676. Les ailes de ces ventilateurs peuvent être planes ou courbes. Quand les ailes sont planes et qu'il en est de même des faces du tambour, l'air s'échappant par tous les points de la circonférence, la section de la veine d'air, à son entrée dans les ailes, est plus petite qu'à la sortie. Mais en donnant aux joues du ventilateur la forme de deux troncs de cône et aux ailes une forme trapézoïdale, on pourra faire varier à volonté le rapport des surfaces d'entrée et de sortie. Lorsque les ailes sont courbes, les orifices de sortie sont les sections

faites dans les canaux à leur extrémité, perpendiculairement à leur axe ; il est évident qu'en donnant aux joues du ventilateur la forme de deux surfaces de révolution, et aux ailes des largeurs convenables aux différentes distances du centre, on pourra, de même que pour les ventilateurs à ailes planes, établir une relation quelconque entre les surfaces des orifices d'entrée et celles des orifices de sortie de l'air.

677. *Ventilateur de M. Combes.* — Ce ventilateur est à ailes courbes. La courbure, à l'origine des ailes, a été calculée de manière à éviter l'effet du choc de l'air, et la courbure à la circonférence de manière à ne laisser échapper l'air qu'avec une faible vitesse. Les figures 97 et 98 représentent deux coupes d'un de ces appareils ; les ailes sont reliées à la plaque DD, fixée à l'arbre A, qui est mis

Fig. 97.

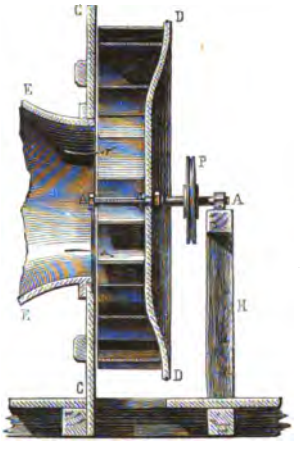


Fig. 98.

en mouvement par la poulie P. Les bords libres des ailes restent toujours, dans leur rotation, à une petite distance du plateau fixe CC ; EE est l'orifice d'accès de l'air.

Pour éviter l'arrivée de l'air extérieur entre le plateau CC et les bords libres des ailes, M. Combes, dans une autre disposition, a placé l'axe de rotation verticalement ; les ailes sont fixées aux deux joues, et la joue inférieure porte autour de l'orifice d'accès un cylindre qui plonge dans un réservoir annulaire plein d'eau.

Sous ces différentes formes et avec différents nombres d'ailes, les ventilateurs de M. Combes ont été employés en Belgique à la venti-

lation de plusieurs mines de houille. M. Glepin, qui a fait beaucoup d'expériences sur un ventilateur horizontal (*Mémoire sur les appareils appliqués à la ventilation des mines*), a reconnu que, quoique la hauteur de l'eau dans le vase annulaire, au-dessus du bord inférieur du cylindre, fût beaucoup plus considérable que la dépression produite, l'eau, constamment agitée par le mouvement du cylindre, était entraînée dans les canaux mobiles, et par conséquent que, si le vase annulaire n'était pas constamment alimenté, il se formait en peu de temps un espace libre par lequel l'air extérieur pénétrait dans le ventilateur. D'après ses expériences, M. Glepin estime que la machine rendait de 0,27 à 0,28 du travail employé à la faire mouvoir ; mais M. Trasenster (*Annales des travaux publics de la Belgique*) pense qu'il y a eu une erreur commise sur l'évaluation du travail moteur, et il réduit le rendement de la machine à 0,15.

M. Glepin a fait construire un autre ventilateur, d'après les mêmes principes, et dans lequel les ailes étaient fixées à un arbre horizontal tournant entre deux murailles parallèles ; mais l'effet utile n'a pas été augmenté par cette nouvelle disposition.

678. *Ventilateur Letoret.* — Cet appareil est composé de quatre ailes rectangulaires en tôle, fixées aux extrémités de deux montants en fer forgé, placés à angle droit sur l'arbre ; les ailes sont articulées et peuvent prendre différentes inclinaisons. Une lame de tôle fixée perpendiculairement à l'axe de rotation sépare les effets produits par les deux ouvertures d'appel. L'appareil est disposé entre deux murs parallèles qui forment les joues du ventilateur.

Un de ces ventilateurs a été établi à la fosse Sainte-Caroline, à Sainte-Victoire-sur-Framies, et son effet utile a été observé par M. Glepin. Voici les dimensions de l'appareil : longueur des ailes, $0^m,77$; largeur, $0^m,93$; diamètre des ouvertures d'accès de l'air, $1^m,60$; distance de l'origine des ailes à l'axe de rotation, $0^m,80$. Dans une des expériences, le volume d'air appelé par seconde était de $2^{mc},939$ à 6°, sous la pression barométrique de $0^m,7312$; l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure était de $0^m,0152$ en eau, et en air de $12^m,49$; le travail effectué était alors de $2,939. 1^k,217. 12,49 = 44^k,67$; ou de 0,595 de cheval-vapeur ; comme le travail transmis, mesuré au frein, était de 3,7 chevaux-vapeur, le travail produit était égal à 0,16 du travail dépensé. Une autre expérience a donné 0,18. Dans la première expérience, l'angle formé par les ailes et les bras du ventilateur était de 135° ; dans la seconde, il était de 105°. Dans cet appareil, il se produisait à la circonférence

des ouvertures centrales un courant dirigé en sens contraire de celui qui avait lieu près de l'axe. Les nombres de révolutions étaient de 113 et de 137 par minute.

Un autre appareil disposé de la même manière, mais avec des dimensions un peu différentes, a été établi au charbonnage de l'Agrappe et Grisoeil, à Frameries, et a donné un meilleur résultat. Longueur des ailes, $0^m,80$; largeur des ailes, $0^m,98$; distance de l'articulation des ailes à l'axe de rotation, $0^m,75$; diamètre des orifices d'accès, $1^m,30$; intervalle des bords des ailes et des murailles, $0^m,055$; angle des ailes et des rayons, 110° ; nombre de révolutions par minute, 144. Effet utile, 0,20 du travail dépensé.

M. Glepin rapporte encore dans son ouvrage les résultats de ses expériences sur un ventilateur établi à la houillère de Marcinelles, disposé d'une manière un peu différente. Ce ventilateur renferme 8 ailes en tôle; ces ailes, dirigées d'abord dans des plans passant par l'axe de rotation, se recourbent suivant des surfaces cylindriques qui viennent couper la circonférence extérieure à une distance de $0^m,135$ du prolongement de leur première direction. Diamètre de la circonférence extérieure, $2^m,046$; diamètre du cylindre décrit par l'origine des ailes, $0^m,630$; largeur des ailes, $0^m,60$; espace libre entre les bords des ailes et les surfaces intérieures des joues, $0^m,025$. L'effet utile a été de $0^m,10$. M. Glepin ajoute : « Si l'effet utile de cet appareil est beaucoup plus faible que celui des ventilateurs de l'Agrappe et de Sainte-Victoire, je pense qu'on doit en attribuer la cause, en grande partie, à la disposition des ailes par rapport aux bras ; car on a remarqué à Sainte-Victoire que, pour une même vitesse de rotation, le travail utile du ventilateur était d'autant plus faible que la direction des ailes se rapprochait davantage de celle des bras. » Une cause qui doit aussi contribuer beaucoup à la diminution de l'effet utile est le faible diamètre des orifices d'entrée. L'air est obligé d'y prendre une assez grande vitesse, d'où résulte une perte de charge notable.

M. Jochams a fait, en 1848, une série d'expériences sur des ventilateurs Letoret, établis dans plusieurs mines de Belgique, et il a trouvé que le travail produit était compris entre 0,25 et 0,30 du travail employé.

679. M. Loyd, ingénieur anglais, a présenté à l'exposition universelle un ventilateur destiné à l'aérage des mines. Cet appareil se compose de deux troncs de cône opposés, renfermant 6 ailes courbes fixées aux deux surfaces coniques ; ces surfaces sont percées au

centre de deux orifices qui reçoivent les tuyaux d'appel autour desquels tourne l'appareil.

680. M. Rittinger, ingénieur viennois a construit des ventilateurs portant 15 ailes courbes qui coupent la circonférence extérieure sensiblement à angle droit et font un angle de 47° avec la circonférence intérieure ; l'air arrive de la mine dans le ventilateur par un canal horizontal, ce ventilateur n'a pas d'enveloppe ; on lui reproche d'être placé en porte-à-faux, ce qui occasionne des frottements ; il a peu réussi.

681. *Ventilateur Guibal.* — Les ventilateurs que nous venons de décrire rejettent directement l'air à leur circonférence ; on croyait à une certaine époque que cette disposition était avantageuse, sinon nécessaire. M. Guibal, ancien élève de l'École Centrale, remarqua qu'en certains points du contour l'air extérieur était appelé, et que par conséquent, il prenait part au mouvement de l'appareil, circonstance qui devait amener des pertes d'autant plus considérables dans le rendement que la résistance dans le conduit d'appel était plus grande. Ces prévisions furent vérifiées par l'expérience, et conduisirent M. Guibal à rétablir l'enveloppe (fig. 99). Par des expé-

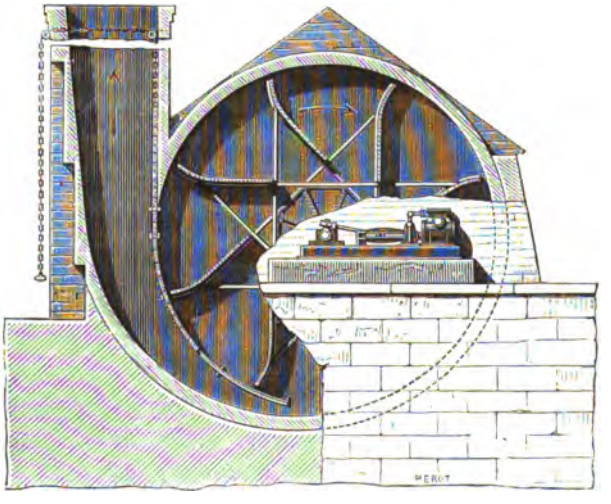


Fig. 99.

riences directes, il put se convaincre que l'air expulsé n'occupait pas tout l'orifice de sortie, 1/5 de la circonférence environ, mais

qu'un courant d'air rentrant en occupait une partie; en disposant une vanne pour régler la sortie de l'air, on arriva à porter l'effet utile à 28 pour 100 environ. Le ventilateur ainsi construit était à la fois aspirant et soufflant, c'était un vice grave. M. Guibal eut l'idée de faire arriver l'air à sa sortie dans une cheminée de section progressivement croissante, sorte d'ajutage évasé qui devait donner lieu à une restitution de force vive. De plus, il agrandit le diamètre des ventilateurs, ne leur fit faire que 60 à 70 révolutions par minute, ce qui permit de les faire attaquer directement par la bielle des machines; on a été conduit ainsi à établir des ventilateurs qui ont jusqu'à 15 mètres de diamètre.

Pour déterminer la valeur de la dépression que peut produire son ventilateur, M. Guibal remarque quelle est la somme de deux autres : l'une h_c due à la force centrifuge, l'autre h_t, due à la force tangentielle.

Si on représente par D le diamètre à l'extrémité des ailes, par d, le diamètre à l'origine des ailes; N, le nombre de tours du ventilateur par minute; s, section de la cheminée à la base; S, section au sommet; on aura :

$$h_c = 0{,}000158\,N^2\,(D^2 - d^2),$$

et

$$h_t = 0{,}000158\,N^2\left(D^2 - D^2\,\frac{s^2}{S^2}\right);$$

d'où enfin :

$$h_c + h_t = 0{,}000158\,N^2\left[2D^2 - \left(D^2\,\frac{s^2}{S^2} + d^2\right)\right].$$

En comparant cette valeur à celles qu'il a observées directement dans des ventilateurs de diamètres différents, M. Guibal a trouvé que les dépressions sont en moyenne les 0,837 de celles que fournit le calcul, de sorte qu'on a :

$$H = 0{,}000132\,N^2\left[2D^2 - \left(D^2\,\frac{s^2}{S^2} + d^2\right)\right];$$

or, l'expérience a conduit à faire

$$d = \frac{D}{3} \qquad \text{et} \qquad s = \frac{S}{3},$$

d'où :

$$H = 0{,}000234\,N^2D^2.$$

formule très-simple et qui donne la dépression qu'on peut obtenir au moyen d'un ventilateur Guibal, de diamètre déterminé. De nombreuses expériences faites en Belgique, en Angleterre et en Allemagne ont montré que quand la vanne est réglée convenablement, les résultats ne s'écartent de ceux que fournit la formule que de 3 ou 4 millimètres d'eau au maximum. (Aérage des mines de houille de la Westphalie, traduit par M. Voisin, *Annales des mines*, tome IV, 5^{me} série.)

Les expériences faites par M. Robert Howe sur le ventilateur de la houillère de Staveley, publiées dans le premier volume des *Transactions of the Derbyshire and Chesterfield institute of mining, civil and mechanical engineers* (1871) ont fourni les résultats suivants :

1° La moyenne des dépressions lorsque le ventilateur a marché à des vitesses de 50 à 60 tours, a été . . . . . 66^{mm},81
la dépression calculée est de . . . . . 65^{mm},70

2° En ce qui concerne le rendement dynamique, les expériences indiquent qu'il a varié de 52,19 pour 100 à 61,55 pour 100 ; le travail moteur ayant été déduit de diagrammes fournis par l'indicateur de Watt ; si l'on admet que le piston d'une machine à vapeur ne transmet à un axe de rotation, pesamment chargé que 0,75 du travail moteur, le rendement réel du ventilateur serait de $\frac{61,55}{0,75} = 88$ pour 100.

3° L'ouverture de la vanne doit être réglée d'une façon déterminée ; M. Howe a trouvé que, pour des vitesses variant de 50 à 65 tours, on obtient les résultats suivants :

Ouverture de la vanne.	Débit moyen par tour du ventilateur.	Effet utile moyen.
4^{m2},249	43^{m3},96	54,27 %
3^{m2},777	47^{m3},07	61,55
3^{m2},305	42^{m3},04	52,19

Il y a donc une ouverture d'échappement qui donne le débit maximum.

M. Guibal a donné pour déterminer la section de la vanne qui donne l'effet utile maximum la formule empirique

$$S = 0,65 \frac{Q}{\sqrt{h}}.$$

Le rapport $\frac{A}{h^2}$ que M. Guibal appelle *tempérament* de la mine, est constant et peut par conséquent se déterminer par une seule expérience.

MM. Gille et Franeau, ingénieurs du corps des mines de Belgique, ont fait des expériences communiquées à la société des anciens élèves de l'École spéciale des mines du Hainaut (septembre 1865), pour déterminer l'influence relative des différentes parties de l'appareil, ils ont trouvé que :

1° L'enveloppe élève un peu les dépressions et augmente l'effet utile.

2° La vanne exerce aussi une action favorable.

3° La cheminée a la plus grande part dans les effets obtenus; ils ont observé en effet que le ventilateur produisait à une vitesse de 72 révolutions par minute, une dépresssion de 58^{mm} d'eau mesurée dans l'ouïe; dans les mêmes conditions de vitesse, la dépression produite par la force centrifuge eût été de $32^{mm},76$, la dépression due à la cheminée est donc de $25^{mm},24$; l'observation directe de la dépression à la base de la cheminée avait fourni $25\ {}_{m}/^{m}$.

Comme on le voit dans la figure, les ailes sont inclinées à 45° sur le rayon : l'enveloppe est en maçonnerie; l'appareil est simple d'installation, d'une grande solidité, et les réparations s'y font très-facilement.

Ventilateurs soufflants.

682. Ces ventilateurs sont disposés de la même manière que les

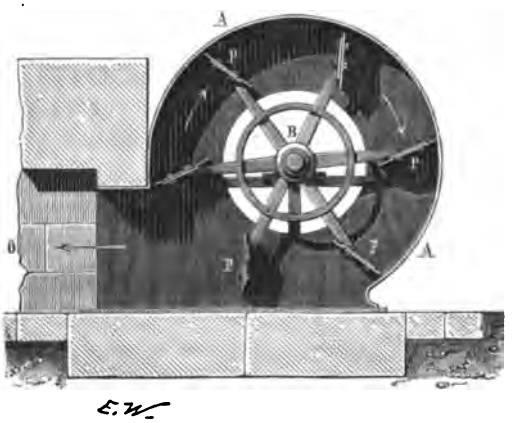


Fig. 100.

ventilateurs aspirants dont nous venons de parler; seulement, les orifices du centre s'ouvrent dans l'air, et la circonférence du tam-

bour est fermée de toutes parts, excepté dans une certaine étendue en communication avec le tuyau qui conduit l'air comprimé.

La figure 100 représente une coupe de la disposition assez généralement employée. Les ailes P sont au nombre de six, légèrement inclinées sur les rayons. Un appareil ainsi disposé, dans lequel le diamètre du tambour A était de 1 mètre; celui des deux orifices d'accès de l'air B, de $0^m,50$; la largeur, de $0^m,20$, suffisait, en faisant 1,000 tours à la minute, pour alimenter deux cubilots, qui fondaient 2,000 kilog. de fonte à l'heure. Le travail employé était d'environ 4 chevaux-vapeur ; l'effet utile n'a point été observé.

683. *Ventilateur de M. Decoster.* — Les figures 101 et 102 représentent une élévation et une coupe du ventilateur soufflant de M. Decoster. Cet appareil est composé d'une caisse en fonte A, ouverte

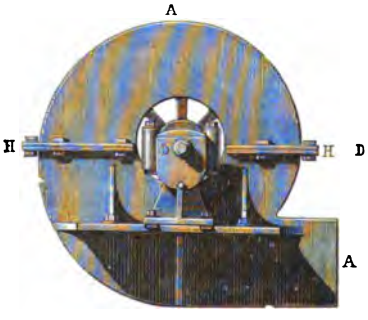


Fig. 101.

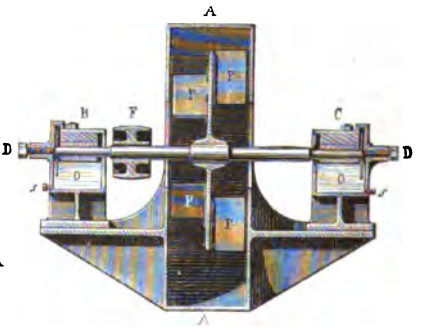


Fig. 102.

sur les deux faces latérales, et traversée par l'arbre DD mis en mouvement par la poulie F ; l'arbre porte, perpendiculairement à sa direction, une plaque en tôle qui partage le ventilateur en deux parties égales, et sur laquelle sont fixées huit ailes planes P, quatre de chaque côté. L'enveloppe est excentrique, de manière que les ailes versent constamment de l'air dans le canal qui enveloppe le cylindre décrit par leurs extrémités, et dont la section croît uniformément et débouche dans le porte-vent.

Cet appareil renferme, pour le graissage des tourillons, une disposition très-ingénieuse ; à l'extrémité des paliers B et C, l'arbre porte un disque qui tourne avec lui, et qui, plongeant dans un réservoir d'huile O par sa partie inférieure, en injecte constamment une certaine quantité sur les coussinets ; S est un bouchon vissé qu'on enlève pour vider le réservoir.

Dans ce ventilateur, les orifices d'accès n'appellent pas l'air uniformément sur toute l'étendue de leur surface; il n'y a presque point d'appel entre les rayons qui passent, l'un par le bord supérieur de l'orifice du tuyau d'écoulement, l'autre par la verticale supérieure. Ce fait bien constaté ne semble pouvoir s'expliquer qu'en admettant que la veine d'air lancée verticalement ferme le canal pour les veines qui viennent à sa suite.

684. *Ventilateur de M. de Lacolonge* (*Annales du Conservatoire*, tome VIII.) — M. de Lacolonge a présenté, à l'Exposition universelle de 1855, un ventilateur formé d'une enveloppe spirale, dont la largeur était de $0^m,155$; les aubes, au nombre de 8, étaient dirigées suivant le rayon et légèrement convexes à leur extrémité, le rayon décrit par l'extrémité des ailes la plus éloignée de l'axe est de $0^m,495$, celui que décrit l'extrémité la plus rapprochée est de $0^m,13$; la buse de sortie est rectangulaire, elle a la largeur de l'enveloppe du ventilateur et sa hauteur est de $0^m,1465$; les deux rayons extrêmes de la spirale diffèrent de la hauteur de la buse; cette spirale est tangente aux deux faces supérieure et inférieure de la buse, en des points placés sur une verticale passant par l'axe des ailes. D'après les expériences faites au Conservatoire des Arts et Métiers, pour des nombres de tours variant par minute de 305 à 817, le rapport de l'effet utile au travail dépensé se serait élevé à peu près régulièrement de 0,13 à 0,64, et la pression en eau de $0^m,024$ à $0^m,164$. Dans cet appareil, l'effet utile augmente, comme on le voit, avec la pression; le contraire a été observé pour tous les appareils précédents.

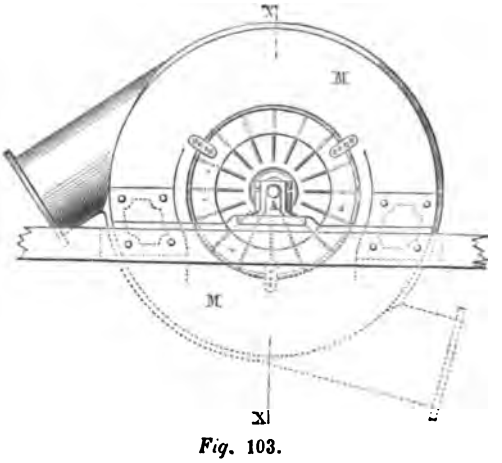


Fig. 103.

685. *Ventilateur de M. Bourdon.* — Les figures 103 et 104 représentent, la première une élévation de l'appareil, la seconde une coupe transversale. La caisse de ce ventilateur est mobile; elle est en tôle, et formée de deux cônes tronqués. La somme des deux orifices d'entrée D, D est un peu plus grande que l'orifice annulaire de sortie. L'appareil est divisé en deux parties

égales par une cloison P, perpendiculaire à l'axe de rotation. Les ailes sont fixées à cette cloison et aux cônes tronqués : elles sont en fer-blanc, courtes, au nombre de trente, et recourbées à leur extrémité dans le sens du mouvement de l'air ; elles partent de l'axe, et leurs bords inférieurs rejoignent perpendiculairement les bords des orifices d'appel D,D, par une courbe concave.

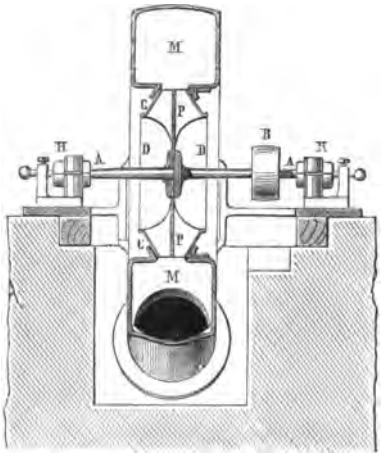


Fig. 104.

L'air est chassé dans une capacité annulaire M en fonte, concentrique à l'axe du ventilateur, et il s'écoule par un tuyau placé tangentiellement à la surface. Deux disques annulaires ajustés contre ce réservoir d'air peuvent être rapprochés, au moyen des vis (*fig.* 106), de la partie mobile du ventilateur, à un point convenable pour empêcher les pertes d'air. Le mouvement est transmis au moyen de la poulie B à l'arbre A qui tourne dans les deux paliers H, H. La figure 107 représente la disposition du graissage. Un disque tournant

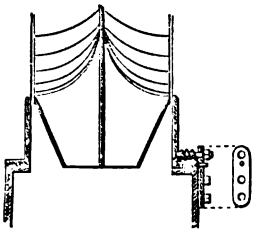


Fig. 105.

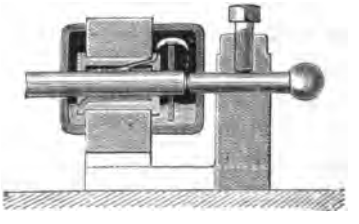


Fig. 106.

amène constamment de l'huile dans le godet supérieur qui la verse sur les parties frottantes.

Il résulte d'expériences nombreuses que la vitesse de sortie de l'air est toujours dans ce ventilateur supérieure de 0,30 environ à celle de l'extrémité des ailes. Nous signalons ce fait, parce qu'on avait cru longtemps que cette dernière vitesse était la vitesse maximum que l'on pouvait imprimer à l'air. En plaçant deux ventilateurs, l'un à la suite de l'autre, et en faisant arriver, dans l'orifice

d'entrée du second, l'air qui sortait du premier, on a pu constater que les pressions s'ajoutaient. Un des grands avantages de cet appareil, c'est l'absence à peu près complète du bruit, même à des vitesses de 2,000 tours par minute. Nous ne connaissons aucune expérience sur son effet utile.

686. La plupart des ventilateurs à force centrifuge font entendre un ronflement d'autant plus énergique que leur vitesse est plus considérable ; c'est là un inconvénient qui s'oppose à leur emploi dans beaucoup de cas, et on s'est préoccupé de l'éviter aussi complétement que possible ; on y est arrivé dans une certaine mesure au moyen de l'excentricité, c'est-à-dire en donnant à l'enveloppe une forme spirale ; mais les appareils qui paraissent le mieux résoudre le problème sont ceux que M. Lloyd avait présentés à l'Exposition universelle de Londres en 1851, et dont le principe a été utilisé depuis par un grand nombre de constructeurs. Les figures 107 et 108 repré-

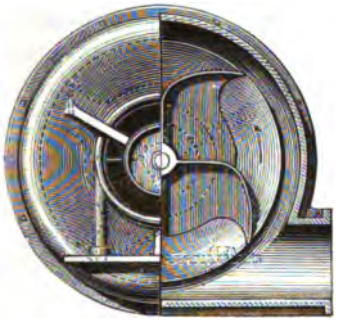


Fig. 107.

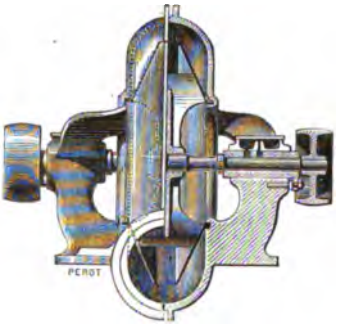


Fig. 108.

sentent un ventilateur de ce système établi par M. Bouhey, ingénieur-mécanicien à Paris.

L'enveloppe est en fonte, elle forme une surface de révolution engendrée par un rectangle terminé par une demi-circonférence ; leurs ailes, au nombre de 4, sont courbes ; leur forme est celle d'une développante de cercle ; elles sont engagées entre deux troncs de cône en tôle auxquelles elles sont fixées et qui, par conséquent, tournent avec elles ; l'intervalle compris entre deux ailes consécutives et les deux troncs de cône forme un canal par lequel l'air doit s'écouler pendant la rotation des ailes, afin que l'afflux de l'air qui se fait simultanément par deux ouïes percées dans les deux côtés et au centre de l'enveloppe ne produise pas de remous. Une plaque

circulaire fixée sur l'arbre entre les deux cônes sert à établir une séparation entre les deux veines d'air affluent. La condition qui fournit l'absence de tout bruit dans le mouvement de l'appareil a été trouvée par l'expérience ; il faut que l'air, en circulant dans le canal laissé entre les ailes et les deux troncs de cône, s'écoule à gueule-bée pendant tout son parcours dans ce canal ; c'est ce qu'on obtient par une détermination convenable des sections de passage ; dans l'appareil dont nous donnons la représentation, le diamètre extérieur des troncs de cône est de $0^m,800$, le diamètre intérieur est de $0^m,400$, le rapport des circonférences est donc de 2 à 1. C'est donc aussi celui des vitesses que tend à donner à l'air la force centrifuge pour des points placés sur cette circonférence ; pour que la vitesse ne soit pas changée par la section traversée, et qu'il ne s'établisse pas de remous provenant de l'introduction de l'air du canal extérieur, il faut que les sections traversées soient dans le rapport de 1 à 2 ; c'est ce qui est observé dans le ventilateur de M. Bouhey où la distance des surfaces, tronc-coniques, est de $0^m,240$ à l'ouïe et de 0,65 seulement à la sortie des ailes. La base d'évacuation est à section circulaire ; elle a $0^m,240$ de diamètre ; le volume d'air que fournit ce ventilateur est égal au volume décrit par les ailes multiplié par 2,9 ; la pression dans la conduite peut atteindre $0^m,40$ d'eau pour une vitesse extérieure des ailes de 76 mètres, qu'on ne dépasse pas dans la pratique.

687. M. C. Schiele, ingénieur-mécanicien à Francfort-sur-le-Mein,

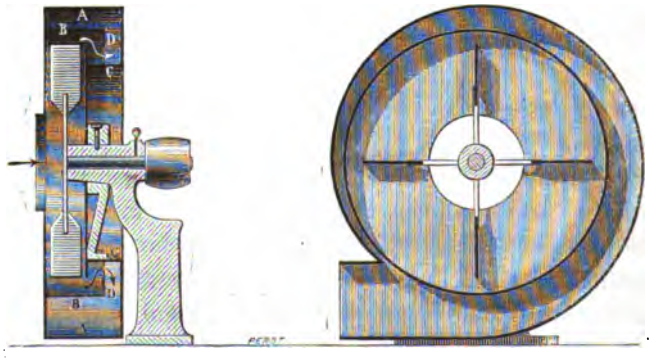


Fig. 109. *Fig.* 110.

construit des ventilateurs silencieux d'une forme toute particulière (*fig.* 109 et 110) ; les ailes sont placées à l'extrémité de l'axe qui

tourne dans un unique support fondé très-solidement; la caisse est en tôle et excentrée, elle est fixée au support au moyen de trois bras E; elle présente au pourtour un élargissement dont la section rectangulaire va en augmentant suivant le rayon dans tout le pourtour de l'appareil; dans cette portion élargie se trouve fixée une partie cylindrique B qui porte un rebord D; cet anneau empêche l'air d'être projeté contre l'anneau extérieur A de la boîte, et le rebord en rétrécissant la section empêche la rentrée de l'air dans la boîte intérieure; c'est surtout à cet anneau que M. Schiele attribue l'absence de bruit que présentent ses ventilateurs. L'air est aspiré par le centre de la face opposée à celle par laquelle pénètre l'axe, il est refoulé par une buse tangentielle à section rectangulaire.

Voici les dimensions, les vitesses et les rendements des appareils, d'après l'auteur, pour les différentes applications auxquelles peuvent être employés ses ventilateurs.

NUMÉROS.	DIAMÈTRE des AILES.	POUR FORGER			POUR FONDRE.			POUR SÉCHER, VENTILER, etc.			DIAMÈTRE des tuyaux de conduite en millimètres.
		PRU à 3 cent. diamètre.	TOURS à la min.	Force cheval.	KILOGR. FER par heure.	TOURS à la min.	Force cheval.	MÈTRES cubes par heure.	TOURS à la min.	Force cheval.	
1	1/4 mètre.	1	4400	1/16	—	—	—	250	3300	1/16	70
2	1/4 —	2	4400	1/8	—	—	—	750	3300	1/8	95
3	1/4 —	3— 5	4400	1/4	450— 750	6600	5/8	1500	3300	1/4	140
4	1/2 —	5—10	2200	1/2	750— 1500	3300	1 1/4	3000	1650	1/2	200
5	1/2 —	10—20	2200	1 1/4	1500— 2500	3300	2 1/2	6000	1650	1	275
6	3/4 —	20—30	1650	2	2500— 3750	2500	4	9000	1250	1 1/2	330
7	1 —	30—45	1100	3	3750— 5000	1650	5	12000	825	2	385
8	1 —	45—70	1100	6	5000—10000	1650	10	24000	825	4	540

688. M. le général Morin a fait sur un ventilateur du genre Lloyd construit par M. J.-F. Cail des expériences dont nous allons exposer les résultats (*Annales du Conservatoire des Arts et Métiers*, t. II, 1862).

On a fait trois séries d'expériences :

Dans la première série pour des vitesses variant entre 171 tours et 452 tours du ventilateur par minute le volume d'air écoulé par seconde a varié de $0^{m3},279$ à $0^{m3},687$. Le rapport de ce volume au nombre de tours par seconde est en moyenne de 0,098.

Dans la deuxième série, la vitesse a varié de 454 tours à 985 par minute; le volume écoulé par seconde a augmenté de $0^{m3},728$ à $1^{m3},666$; le rapport de ce volume au nombre de tours par seconde a été de 0,098.

Enfin, dans une troisième série, on a fait marcher le ventilateur depuis 169 tours jusqu'à 706 par minute et la dépense par seconde a varié de $0^{m3},300$ à $1^{m3},039$; le rapport du volume écoulé au nombre de tours par seconde a été de 0,100; on voit donc que ce rapport reste sensiblement constant, quelle que soit la vitesse du ventilateur.

Le rapport du volume d'air écoulé au volume engendré par les palettes a été trouvé égal à 2,90.

Quant à l'effet utile observé, il croît avec la vitesse qu'on donne au ventilateur; pour des vitesses qui ont varié entre 454 tours et 985 l'effet utile a varié entre 0,100 et 0,278.

Le ventilateur employé avait $0^{m},770$ de diamètre à l'extérieur des ailes, l'enveloppe était excentrée et son diamètre variait de $0^{m},900$ à 0,160, le vent s'écoulait dans les deux premières séries d'expérience par un tuyau de $0^{m},30$ de diamètre et de $26^{m},00$ de longueur; dans la troisième série, la base d'écoulement avait le même diamètre, mais $6^{m},00$ seulement de long.

M. le général Morin a aussi fait des expériences sur un ventilateur soufflant non excentré, à palettes planes; pour des vitesses variant de 342 tours à 872 par minute, le volume d'air écoulé par seconde a varié de $0^{m3},580$ à $1^{m3},520$; le rapport de ce volume au nombre de tours par seconde a été sensiblement constant et égal à 0,094.

Le rapport du volume d'air écoulé au volume engendré par les ailes a été en moyenne de 1,06.

Pour des vitesses variant de 440 tours à 860 tours par minute l'effet utile s'est élevé de 0,11 à 0,15.

L'enveloppe cylindrique du ventilateur avait $0^{m},75$ de diamètre intérieur; la circonférence extérieure des palettes avait 0,67 de diamètre; les palettes avaient 0,33 de largeur dans le sens de l'axe et $0^{m},18$ dans le sens du rayon; le tuyau de refoulement avait 28^{m} de long et $0^{m},30$ de diamètre.

689. *Expériences de M. Dolfus.* — M. E. Dolfus a fait un très-grand nombre d'expériences pour déterminer les formes et les dimensions les plus avantageuses des ventilateurs soufflants (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*). Les ventilateurs employés étaient tous à joues et à ailes planes, et par conséquent à sections croissantes. Les effets produits étaient mesurés par la pression

exercée sur une feuille de carton suspendue verticalement, à une petite distance et en avant de l'ouverture de sortie de l'air. La feuille de carton était supportée par une lame de bois verticale fixée à l'extrémité d'une romaine, dont on faisait varier le poids de manière à maintenir la feuille dans sa position primitive.

Ces expériences ont été faites sans aucune prévision théorique, et les moyens employés pour la mesure des effets produits ne présentent pas toute la certitude qu'on pourrait désirer ; cependant il résulte de ces expériences quelques faits importants que nous croyons devoir rapporter :

1° Les bords des ailes doivent être aussi rapprochés que possible des joues ;

2° La hauteur des ailes doit excéder la moitié du rayon de l'orifice d'accès ;

3° Le nombre des ailes doit augmenter avec le diamètre de l'orifice d'accès, et ce nombre doit être plus grand quand l'enveloppe du ventilateur est excentrique à l'axe de rotation ;

4° L'orifice d'accès doit être elliptique et un peu excentrique, le centre de l'orifice étant au-dessus du rayon parallèle au plan de l'ouverture de sortie de l'air.

Les trois premières conditions se comprennent facilement. Il n'en est pas de même de la dernière qui, au premier abord, paraît fort singulière ; mais il faut remarquer qu'il s'agit de ventilateurs soufflants, dans lesquels la symétrie par rapport à l'axe n'existe pas. On a pu voir, par les descriptions que nous avons données des appareils les plus employés, que ces dernières conclusions n'ont pas été sanctionnées par la pratique.

Ventilateurs aspirants et soufflants.

690. Ces ventilateurs sont disposés comme ceux dont je viens de parler ; ils n'en diffèrent qu'en ce que l'air d'appel, au lieu d'entrer librement dans le ventilateur, n'y pénètre qu'après avoir parcouru un canal plus ou moins long. C'est, par exemple, le cas d'un ventilateur qui serait employé à remplacer une cheminée. La fumée étant complétement refroidie dans son parcours autour des surfaces de chauffe, l'appareil, placé au bout du fourneau appellerait l'air du foyer et le pousserait dans la cheminée, dont le seul effet serait alors de rejeter les produits de la combustion à une hauteur convenable dans l'atmosphère. En général, les ventilateurs aspirants et soufflants

sont construits comme les ventilateurs soufflants. On se contente d'adapter à ces derniers des tuyaux ajustés d'un côté sur les orifices d'accès de l'appareil, et communiquant de l'autre avec la capacité d'où l'on veut extraire l'air.

Ventilateurs multiples.

691. Afin d'augmenter la pression du vent que peut fournir un ventilateur, on a songé à employer des appareils multiples, disposés de telle façon que l'air refoulé par un premier ventilateur est amené par un tuyau à l'ouïe d'un second ventilateur.

Déjà en 1836 M. Burdin, ingénieur en chef des mines (*Annales des mines*, 3^{me} série, tome X), dans un travail relatif à la théorie des ventilateurs, étudie les conditions de l'établissement d'un ventilateur triple, et donne les formules qui permettent, suivant lui, d'en déterminer le rendement.

M. Cadiat avait essayé, sans y réussir, de réaliser les conditions pratiques de fonctionnement d'un ventilateur multiple (*Publication industrielle* de M. Armengaud, tome II, 1842).

Un brevet fut pris en 1842, par M. Peugeot, sur le même sujet, il ne paraît pas qu'il y ait été donné suite.

M. Perrigault, mécanicien à Rennes, a construit un ventilateur à aubes planes, pouvant amener la pression de l'air jusqu'à 0^{m},75 d'eau.

Ce ventilateur est double; les deux corps sont sensiblement circulaires, mais excentrés; les volants ont 0^{m},60 de diamètre, et portent chacun 8 palettes équidistantes formant rayon, le jeu autour des palettes va en augmentant, depuis l'entrée jusqu'à la sortie, depuis 0^{m},04 jusqu'à 0^{m},10; l'ouverture au centre a 0^{m},26 de diamètre, et celle du second tambour est raccordée au tuyau d'expulsion du premier par un tuyau de même section, contourné de façon à éviter les pertes de force vive; la largeur des tambours est de 0^{m},125, celle des ailettes est de 0^{m},075.

Des expériences ont été faites sur ce ventilateur au Conservatoire des Arts et Métiers par M. Tresca. Dans une première série d'expériences, la pression obtenue a été de 0^{m},735 d'eau, pour une vitesse de 1,908 tours par minute; l'effet utile dans cette première série d'expériences a atteint 40,8 pour 100.

Dans une seconde série d'expériences, la pression s'est élevée jusqu'à 0^{m},400 d'eau, pour une vitesse de 1,622 tours par minute; l'effet utile a été de 48,5 pour 100.

692. La théorie mathématique des ventilateurs constitue un problème très-complexe, sur lequel nous n'avons pas à nous arrêter ici; le lecteur pourra à cet égard consulter un travail de M. Burdin (*Annales des mines*, 3^{me} série, tome X); un autre de M. Résal (*Annales des mines*, 5^{me} série, tome V); une étude très-complète sur les ventilateurs aspirants et sur les ventilateurs soufflants par M. de la Colonge (*Annales du Conservatoire*, tome VIII), et enfin un travail sur les ventilateurs à force centrifuge, où le problème paraît réduit à ses termes les plus simples, par M. Émile Harzé (*Revue universelle de M. Cuyper*, tome XXVII).

CHAPITRE III

Ventilateurs à vis.

693. *Ventilateur de M. Motte.*— Cet appareil se compose de deux surfaces héliçoïdales H (*fig.* 110), dont la hauteur est tantôt égale au pas, tantôt seulement à un demi-pas (*fig.* 112). L'axe AA de ces surfaces tourne dans un cylindre en tôle ou en fonte C, qui communique par un bout avec le tuyau d'appel, et par l'autre avec le tuyau d'écoulement. M. Combes, dans son *Traité de l'aérage des mines*, a donné une théorie de cet appareil, d'après laquelle tous les filets

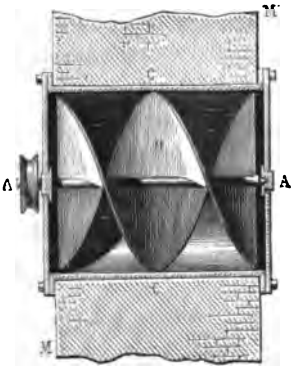


Fig. 111.

Fig. 112.

fluides tendent à traverser l'hélice parallèlement à l'axe avec une vitesse proportionnelle à leur distance du centre; mais, comme la pression est plus forte en aval qu'en amont, l'air tend à se mouvoir

en sens contraire avec une vitesse correspondante à la différence des pressions. Il résulte de là qu'il existe une distance de l'axe à laquelle ces deux vitesses sont égales, qu'à partir de cette distance les vitesses en sens contraire vont en croissant à mesure qu'on s'en éloigne, et par suite que l'air se meut en sens contraire dans le voisinage de l'axe et du cylindre enveloppant.

L'expérience confirme les résultats de la théorie relativement à l'existence des deux courants en sens contraires, mais non sur le rayon du cylindre où les vitesses se détruisent. M. Trasenster, en appliquant le calcul à quelques résultats d'expérience, a constaté que le rayon du cylindre était plus petit que le rayon indiqué par la théorie. Il est évident qu'on peut empêcher les courants en retour, en fixant la surface héliçoïdale sur un cylindre d'une dimension convenable.

Un ventilateur de M. Motte, employé dans la mine de Sauwartan, a $1^{m},40$ de diamètre et une hauteur égale à la moitié du pas. D'après les expériences de M. Glepin, pour 450 et 506 tours par minute, les volumes d'air écoulés étaient de $3^{mc},908$ et $4^{mc},228$. Les dépressions en eau étaient de $0^{m},0216$ et $0^{m},025$. Quant à l'effet utile, M. Glepin l'a trouvé égal à 0,33 et 0,31 ; mais, d'après des essais au frein faits par M. Ponson sur ce ventilateur, le rendement serait seulement de 0,26 à 024,. Des expériences plus récentes encore réduiraient l'effet utile à 0,20 ou 0,21.

Un autre ventilateur de même nature, établi à la mine de Monceau-Fontaine, mais qui n'a que $0^{m},80$ de diamètre, a été essayé avec des vitesses de 750 et de 600 tours par minute ; les dépressions en eau étaient de $0^{m},0063$ et $0^{m},0065$; les volumes d'air extraits de $2^{mc},152$ et $1^{mc},790$, et les effets utiles de 0,17 et 0,20.

694. *Ventilateur Pasquet.*— Le ventilateur de M. Pasquet est fondé sur le même principe que celui de M. Motte ; mais, au lieu d'avoir, comme ce dernier, des filets héliçoïdaux continus, il est formé d'un noyau cylindrique sur lequel sont fixées 3 ou 6 rampes héliçoïdales, dont chacune n'est que le $\frac{1}{3}$ ou le $\frac{1}{6}$ d'un pas de vis complet. Ces rampes sont en tôle mince et fixées par des cornières au noyau intérieur et au cylindre extérieur. L'axe du ventilateur est placé verticalement.

Dans les premiers ventilateurs, on avait donné aux canaux mobiles une section plus grande à l'entrée qu'à la sortie, dans le but de faciliter le mouvement de l'air. Mais on a reconnu que l'effet utile n'était pas augmenté par cette disposition, et on l'a supprimée.

Plusieurs ventilateurs de ce système ont été établis sur des charbonnages en Belgique, et quelques expériences ont été faites par M. Jochams.

En voici les résultats :

Les nombres de tours étaient

331 300 330;

les dépressions manométriques

$0^{m},030$ $0^{m},030$ $0^{m},028$;

les volumes d'air aspiré

$8^{mc},873$ $6^{mc},063$ $10^{mc},369$;

et les effets utiles

0,275 0,275 0,355.

Une expérience faite en interceptant toute communication avec les travaux a donné une dépression maximum de $0^{m},060$, au moyen de 303 révolutions par minute.

695. *Ventilateur de M. Staib.*— En 1849, M. Staib présenta à la Société des arts de Genève un ventilateur à vis, et M. Colladon fut chargé de faire un rapport sur cet appareil. Nous allons en résumer les parties les plus importantes.

Ce ventilateur se compose de quatre ailes également espacées autour d'un axe vertical. La hauteur du pas de vis complet est d'environ $0^{m},30$. Chacune des ailes a $0^{m},05$ de hauteur et ne représente qu'un sixième de la surface d'un filet entier. Par conséquent, la projection de ces quatre ailes sur un plan ne couvre que les deux tiers de la section du cylindre. Le diamètre de la vis est de $0^{m},30$. Elle tourne dans un cylindre en tôle d'un diamètre un peu plus grand pour éviter les frottements contre l'enveloppe.

Pour mesurer la vitesse de l'air dans le tuyau, on n'a pas fait d'expériences manométriques ou anémométriques; mais on a installé dans le même tuyau deux vis pareilles; on a fait tourner l'une avec une certaine vitesse, l'autre a fait par seconde un certain nombre de tours, et on a pris pour volume écoulé la moyenne entre les volumes théoriques engendrés par chaque vis. M. Colladon a trouvé ainsi que le volume réel débité était les 0,84 du volume théorique. Quelques expériences, dans lesquelles on mesurait le temps que la fumée d'une

lampe de térébenthine mettait à passer d'une extrémité du tuyau à l'autre, semblent confirmer ce chiffre.

Quant au rendement, il a été mesuré au moyen d'un poids agissant sur le ventilateur par l'intermédiaire de moufles et de vis sans fin. M. Colladon l'a trouvé égal à 0,30 environ.

696. *Ventilateur de M. Lesoinne.* — M. Lesoinne, professeur de métallurgie à l'Université de Liége, a pensé que le meilleur récepteur de la force du vent devait donner de bons résultats pour l'extraction de l'air vicié des mines, et il a fait construire un appareil analogue aux ailes de moulin à vent. Cet appareil a été installé dans quelques mines en Belgique. Il est formé de six ailes en tôle, de 1,5 à 2 millimètres d'épaisseur, rivées sur des rayons en fer qui sont fixés d'un côté à un noyau central, et de l'autre à une couronne circulaire. L'inclinaison de ces ailes est, comme pour les moulins à vent, de 18 à 19° au noyau, et 6 à 7° à la circonférence. Lorsqu'on donne un mouvement de rotation à cet appareil, l'air glisse sur les ailes et se répand dans l'atmosphère; le vide relatif produit appelle l'air de la mine, qui est chassé à son tour de la même manière.

Nous ne connaissons que peu d'expériences faites sur ce ventilateur, qui n'a fonctionné qu'à de faibles dépressions, $0^{m},013$ au plus. En voici les résultats, tirés de l'ouvrage de M. Ponson. Les deux premières ont été faites sur le ventilateur du Grand-Bac, la troisième sur celui du Val-Benoît :

Les nombres de révolutions par minute étaient

162	175	201,5;

les volumes d'air aspiré par seconde

$7^{mc},500$	$8^{mc},500$	$9^{mc},120$;

et les dépressions manométriques

0,005	0,005	0,013.

Les expérimentateurs n'ont pas cherché à évaluer le rapport du travail moteur au travail utile; mais quelques calculs font croire à M. Ponson que ce rendement n'a pas été supérieur à 26 pour 100.

Un certain nombre de ces appareils sont établis dans la province de Liége pour suppléer, pendant l'été, à l'insuffisance de la ventilation.

697. *Ventilateur de M. Guérin.* — Il est employé pour la ventilation des bâtiments; il se compose de deux demi-spires, formées

chacune de sept palettes planes en forme de trapèze, inclinées à 38° sur le plan de rotation, et dirigées selon le plan tangent à la surface héliçoïdale qui serait formée par l'axe des bras qui les supportent.

M. Morin a expérimenté un de ces appareils (*Annales du Conservatoire*, tome II); le diamètre de l'hélice était de $0^m,480$, la longueur des demi-spires était de $0^m,700$; elles tournaient dans un cylindre de $0^m,500$ de diamètre.

Pour des vitesses variant de 250 à 822 tours par minute, le ventilateur agissant par aspiration dans un tuyau de $0^m,30$ de diamètre et de $28^m,50$ de longueur; le volume d'air appelé a varié de $0^{m3},1904$ à $0^{m3},577$ par seconde, et le rendement s'est élevé de 0,0315 à 0,0902.

Le ventilateur agissant par insufflation dans le même tuyau, les vitesses ont varié de 290 à 765 tours par minute, le volume d'air appelé a été de $1^{m3},504$ à $5^{m3},300$, et le rendement s'est élevé de 0,0149 à 0,0455.

D'après les expériences, l'effet utile augmente avec la vitesse jusqu'à 500 ou 500 tours, après quoi il semble à peu près stationnaire. Le rendement par aspiration est notablement plus considérable que le rendement obtenu par insufflation.

Quant au rendement en volume, M. Morin a trouvé que le ventilateur fonctionnant par aspiration, le volume d'air appelé est les 0,592 du volume engendré par l'hélice; et qu'il se réduit aux 0,337, lorsque le ventilateur fonctionne par insufflation.

CHAPITRE IV

Roues pneumatiques.

698. *Appareil de M. Fabry.* — M. Fabry, aspirant-ingénieur des mines de Charleroy, a imaginé un appareil qui diffère complétement de tous ceux que nous venons d'indiquer, mais dont l'idée première se trouve dans la machine à vapeur rotative de Murdock de Cornwall, brevetée en 1799.

Ce ventilateur se compose (*fig.* 115) de deux roues à trois ailes pleines A, A, A, mobiles autour des axes C, C dans les deux coursiers D, D, en s'approchant le plus près possible de deux murs latéraux. Les roues ont des vitesses égales et en sens contraires, produites par des engrenages extérieurs, qui ne sont point indiqués dans la

figure ; chaque aile porte une pièce de fonte pleine B, perpendiculaire à sa direction, terminée par une surface courbe cylindrique ayant une hauteur égale à la largeur du coursier, et dont la courbure et l'étendue ont été déterminées de manière à intercepter complété-

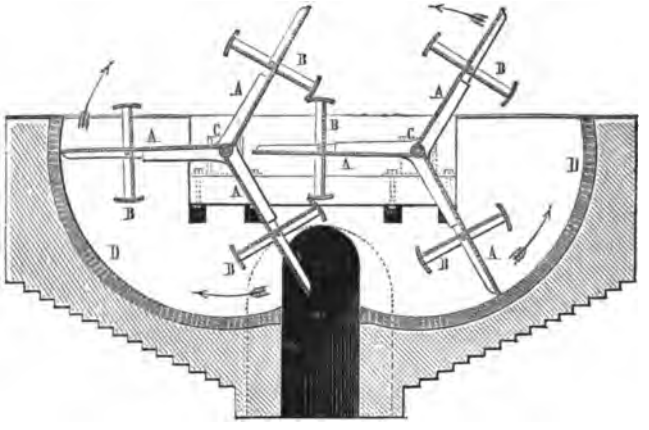


Fig. 113.

ment la communication du puits avec l'extérieur pendant le mouvement des roues. Il résulte de cette disposition que chaque roue, dans une rotation, fait sortir un volume d'air égal au volume du cylindre décrit par l'extrémité des ailes ; l'appareil fait rentrer en même temps un volume d'air égal à trois fois celui qui est renfermé entre les ailes et les supports des surfaces courbes dont nous venons de parler ; mais ce dernier est toujours très-petit relativement au premier.

Les ventilateurs de M. Fabry ont tous à peu près les mêmes dimensions ; les ailes ont environ $1^{m},70$ de longueur et 2^{m} de largeur. Le volume d'air théorique extrait par chaque tour de roue est de 23^{mc} à 24^{mc} ; mais le volume obtenu par l'expérience est toujours plus petit, à cause des fuites qui existent nécessairement entre les roues et le coursier, et entre les deux roues elles-mêmes.

M. Jochams a fait sur cet appareil, avec le plus grand soin, un grand nombre d'expériences qui sont détaillées dans le tome XI des *Annales des travaux publics de Belgique ;* mais il est à regretter que cet ingénieur n'ait pu, pour déterminer l'effet utile, employer d'autre méthode que celle des coefficients de réduction du moteur. Il en est résulté des rendements incontestablement trop forts, comme le démontre M. Trasenster dans un mémoire où il discute les résultats de

de M. Jochams. Nous allons citer quelques expériences, en adoptant les chiffres de M. Trasenster.

Le siége d'exploitation n° 5 de la mine du Gouffre, à Chatelineau, se compose de deux puits, profonds chacun de 425^{m}. Le courant ventilateur descend par le puits d'extraction, et se divise en quatre courants partiels qui se réunissent pour aboutir à l'appareil d'aérage. M. Jochams a fait quatre expériences dans des conditions différentes, d'abord avec les quatre courants, puis en supprimant successivement un, deux et trois courants. En voici les résultats :

1° Avec les quatre courants partiels, le nombre de tours du ventilateur étant de 30 par minute, la dépression a été de 0^{m},022 ; le volume extrait par seconde de 9^{mc},590, et le rapport de l'effet utile à la force dépensée de 0,453.

2° Avec trois courants, les mêmes quantités ont été

35,3	0^{m},040	10^{mc},136	0,452

3° Avec deux courants,

30	0^{m},051	8^{mc},409	0,57

4° Avec un seul courant,

33,6	0,068	7^{mc},998	0,556

Au puits n° 3 du même charbonnage, M. Jochams a fait d'autres expériences ; et, pour savoir quelle était la dépression maximum qu'on pouvait obtenir, il a fait boucher complétement l'orifice du puits d'entrée de l'air. Il a obtenu ainsi, pour 23 tours de l'appareil, une dépression de 0^{m},086 et un volume de 4^{mc},204. Le rendement était de 0,493.

Il résulte de ces expériences des conséquences importantes :

1° La division du courant ventilateur en plusieurs courants partiels est une condition qu'il faut essayer de remplir autant que possible ; en effet, les expériences prouvent que la dépression, et par suite le travail à produire, varient en raison inverse du nombre des courants partiels ; ce qui s'accorde d'ailleurs avec les résultats du calcul.

2° Le volume pratique engendré par les roues pneumatiques va en diminuant à mesure que la dépression augmente ; en effet, si on fait le calcul pour les quatre expériences du puits n° 5, on trouve que, pour les dépressions

0^{m},022	0^{m},040	0^{m},053	0^{m},068

Les volumes pratiques sont

$19^{mc},180$ $17^{mc},277$ $16^{mc},818$ $14^{mc},282.$

Ce résultat est facile à comprendre. En effet, il est évident que les fuites doivent être d'autant plus grandes que la dépression est plus considérable. M. Jochams les estime à 20 p. 100 pour les dépressions au-dessus de 10 millimètres, à 40 p. 100 lorsque la dépression dépasse 60 millimètres, et à 55 p. 100 lorsqu'elle atteint le chiffre de 86 millimètres.

3° M. Jochams ajoute : « Il semble résulter des nombreuses observations que j'ai faites que, dans les mêmes conditions de travaux, la dépression croît comme le carré de la vitesse de l'appareil ventilateur. » Ce résultat est aussi facile à expliquer ; en effet, si on suppose que le volume pratique reste constant, ce qui a sensiblement lieu pour des dépressions variant de $0^m,020$ à $0^m,050$, limites des expériences en question, la vitesse de l'air dans la mine est proportionnelle à la vitesse du ventilateur ; et comme, d'un autre côté, les pertes de charges sont proportionnelles au carré de cette vitesse, les faits observés sont une conséquence naturelle de la loi du mouvement des gaz.

4° Enfin, le rapport du travail utile au travail moteur ne diminue pas, comme dans les autres ventilateurs, à mesure que la dépression augmente ; il semble, au contraire, que ce rendement tend vers un maximum qui correspond à une dépression comprise entre 60 et 70 millimètres. Ce rapport est du reste sensiblement constant, et ne varie que de 0,45 à 0,57 à peu près.

699. *Ventilateur de M. Lemielle.* — Les figures 114 et 115 représentent deux coupes suivant HH, et FF de cet appareil. Il est composé de deux cylindres de fonte : le premier B est fixe et garni de deux larges ouvertures pour l'accès et la sortie de l'air ; le second A, placé dans l'intérieur du premier, est mobile sur son axe qui reçoit un mouvement de rotation continu au moyen d'une poulie D. Ce cylindre porte à sa surface extérieure six palettes courbes articulées *f*, *f*, *f*,..., dont l'inclinaison est produite par des tiges *t*, *t*, *t*,..., qui sont fixées à des manchons *o*, *o*, *o*... placés autour de l'arbre coudé CC, du cylindre intérieur et qui traversent sa surface. Il résulte de cette disposition que les palettes prennent les différentes inclinaisons indiquées dans la figure 114, et pour chaque sixième de tour, le volume d'air est égal au volume compris entre la palette qui vient fermer l'orifice d'accès et celle qui la précède, c'est-à-dire à

peu près à $\frac{1}{6} L\pi (R^2 - r^2)$, L désignant la hauteur commune des deux cylindres, R le rayon maximum des palettes, et r le rayon du tambour. Il est à craindre que, dans cet appareil, les rentrées d'air par le coursier et les rainures du tambour, à travers lesquelles pas-

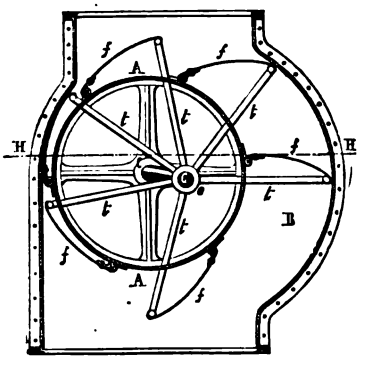


Fig. 114.

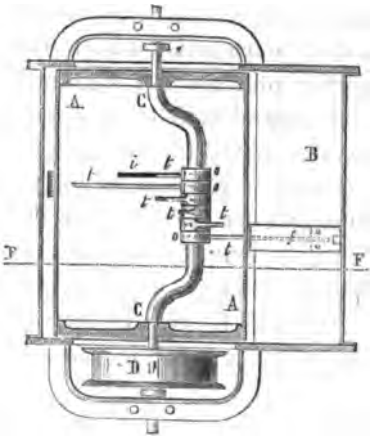


Fig. 115.

sent les tiges qui produisent les inclinaisons des palettes, ne soient considérables, et surtout que les nombreuses articulations ne soient, pour des appareils de grandes dimensions, une cause de dérangement et de frais considérables d'entretien.

Le ventilateur de M. Lemielle fonctionne dans quelques mines de houille de France et de Belgique, et, d'après M. Glépin, il rendrait, en parfait état, de 0,55 à 0,60 du travail dépensé pour des dépressions de $0^m,10$, à $0^m,20$ d'eau.

CHAPITRE V

Machines à piston.

700. Les machines à piston sont formées, en général, de deux cylindres en bois avec armatures de fer, dans chacun desquels se meut un piston portant plusieurs soupapes. Les fonds des cylindres sont aussi garnis de plusieurs soupapes qui s'ouvrent de bas en haut. Les pistons sont solidaires, et leur mouvement en sens inverse est produit par une machine à vapeur. Ils sont tantôt suspendus à des

chaînes enroulées sur des arcs de cercle qui terminent le balancier, tantôt guidés par des parallélogrammes de Watt; quelquefois enfin la machine à vapeur est placée au-dessus des cylindres, et son piston porte deux tiges qui se terminent par des chaînes plates enroulées sur des poulies et supportant les pistons des cylindres à air. Les parties inférieures de ces cylindres communiquent avec une galerie horizontale qui s'ouvre dans le puits d'aérage. Les soupapes sont le plus souvent équilibrées.

Un grand nombre de ces machines ont été établies en Belgique; les ouvrages de M. Glépin et de M. Ponson, dont j'ai déjà parlé, renferment les plans et les descriptions de plusieurs de ces appareils, ainsi que les résultats des nombreuses expériences faites pour déterminer leurs effets utiles. J'ai extrait de l'ouvrage de M. Glépin les renseignements les plus importants.

701. Les travaux de la fosse n° 1 du Grand-Buisson sont aérés par une machine à piston, composée de deux cylindres en bois cerclés

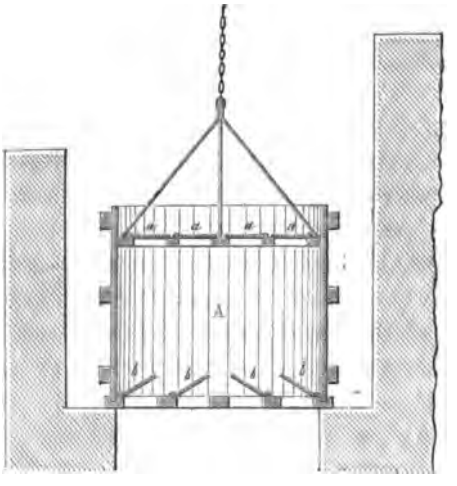


Fig. 116.

en fer, de $3^m,53$ de diamètre intérieur et de $0^m,06$ d'épaisseur; leurs fonds, ainsi que les pistons, sont percés de dix ouvertures garnies de clapets en tôle; ceux des pistons sont équilibrés par des contrepoids. La figure 116 représente une coupe verticale d'un des cylindres A; *a*, *a*... représentent les clapets du piston; *b*, *b*... ceux des fonds; la course de chaque piston est comprise entre $1^m,70$ et $1^m,90$. La machine à vapeur est horizontale et placée au-dessus des cylindres;

les chaînes de suspension des pistons des pompes, après avoir passé sur des poulies, sont attachées aux extrémités des tiges des pistons du moteur.

Dans une première expérience, la machine appelait $5^{mc},925$ d'air par seconde à la température de $4°,15$ et sous la pression de $0^{m},7517$; le nombre des excursions complètes, montée et descente, était de 13,15 par minute, l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure était en moyenne de $0^{m},1214$ en eau, ou de $96^{m},42$ en air; alors le travail effectué par la machine était égal à $5,925. 1,259. 96,42 = 719^{km},25$, ou 9,59 chevaux-vapeur ; et comme le travail dépensé était de 26,62 chevaux-vapeur, il s'ensuit que la machine utilisait les 0,36 du travail moteur. Deux autres expériences faites dans des conditions différentes ont donné pour le travail utilisé 0,408 ; 0,377.

Dans ces expériences, M. Glépin a reconnu que le manomètre à eau qui indiquait la dépression dans la galerie éprouvait des variations un peu différentes pendant l'ascension des deux pistons ; pour le premier, à l'origine du mouvement, la hauteur du manomètre était de $0^{m},035$, elle s'élevait ensuite jusqu'à $0^{m},21$, puis elle diminuait jusqu'à $0^{m},055$, et elle remontait jusqu'à $0^{m},16$ à la fin de la course. Pour le second piston, les indications du manomètre variaient d'une manière analogue, mais les limites étaient, dans les mêmes circonstances, $0^{m},065$; $0^{m},17$; $0^{m},065$; $0^{m},18$. Pendant l'ascension des pistons, le manomètre qui s'ouvrait au-dessous indiquait une dépression nulle à l'origine de l'ascension ; elle s'élevait presque instantanément à $0^{m},2125$, et quelquefois à $0^{m},2325$, puis décroissait graduellement jusqu'à $0^{m},13$ ou $0^{m},15$; elle augmentait ensuite jusqu'à $0^{m},18$ ou $0^{m},20$, et restait stationnaire jusqu'à la fin de la course. Pendant l'ascension des pistons, l'excès moyen de pression était au commencement de $0^{m},0225$; et, après l'ouverture des clapets, elle restait à $0^{m},02$ pendant la descente du piston.

702. Une autre machine disposée de la même manière, employée à la ventilation des travaux de la fosse n° 2 du charbonnage de la Grande-Veine du bois de Saint-Ghislain, a donné de moins bons résultats. Le volume d'air appelé par seconde était de $2^{mc},615$ à la température de 13° et sous la pression de $0^{m},7511$; la dépression moyenne dans la galerie était de $0^{m},0336$ en eau ou de $27^{m},63$ en air ; alors le travail produit était égal à $2,615. 1,216. 27,63 = 87^{km},859$, ou 1,171 cheval-vapeur; la force motrice dépensée étant de 4,448 chevaux, la machine en utilisait seulement 0,26. Le manomètre qui s'ouvrait dans la galerie indiquait une dépression nulle au commen-

cement de la levée du premier piston, et pendant 1 : 14 de la durée totale de l'ascension ; une pression de $0^m,209375$ pendant 2 : 14 du temps total de l'ascension ; une dépression de $0^m,033625$ pendant le reste de la montée. Le manomètre adapté sur un des pistons indiquait une dépression nulle à l'origine du mouvement. Elle s'élevait ensuite rapidement à $0^m,055$, et augmentait jusqu'à $0^m,065$; pendant la descente du piston, l'excès de pression était de $0^m,02$. M. Glépin attribue les mauvais résultats de cette machine, comparée à la première, à une difficulté plus grande que l'air éprouve pour ouvrir les clapets et au peu de soin avec lequel elle était entretenue.

703. Une autre machine à piston disposée encore de la même manière a donné un meilleur résultat. Le volume d'air aspiré par seconde était de $4^{mc},545$ à la température de 13°5, sous la pression de $0^m,749$; la dépression dans la galerie était en moyenne de $0^m,1025$ en eau et de $84^m,59$ en air ; alors le travail effectué étant de 4,545. 1,211. 84,59 = 465^{km}, ou 6,207 chevaux-vapeur ; le travail moteur étant de 22,5 chevaux-vapeur, la machine utilisait 0,30 du travail employé. Pendant l'ascension du premier piston, le manomètre du cylindre indiquait une dépression qui croissait graduellement de 0 à $0^m,29$; décroissait ensuite jusqu'à 0^m, 05, et s'élevait enfin de nouveau jusqu'à $0^m,075$, limite qu'elle atteignait à la fin de l'ascension ; pendant la descente l'excès moyen de pression était de $0^m,035$. Pour l'autre piston, le manomètre qui s'ouvrait au-dessous indiquait une dépression croissant de 0 à $0^m,255$; décroissant ensuite jusqu'à $0^m,045$ et s'élevant enfin à $0^m,07$; et le même manomètre indiquait pendant la descente un excès de pression intérieure de $0^m,0325$. M. Glépin attribue la différence entre les effets produits par cette machine et celle du Grand-Buisson à ce qu'elle a été construite avec moins de soin, et que les clapets des pistons ne sont pas équilibrés.

Ces machines produisent un effet utile assez considérable quand elles ont été construites avec soin et que les clapets sont équilibrés ; cependant il y a dans toutes une cause de perte très-notable résultant de ce que les orifices d'entrée et de sortie ont une trop petite surface. Ces machines ont en outre l'inconvénient de ne pas produire un appel régulier, et d'exiger de trop grands frais d'installation.

CHAPITRE VI

Machines à cloches plongeantes.

704. Ces machines, employées depuis longues années dans les mines du Hartz, se composent de deux cloches en tôle, soutenues aux deux extrémités d'un balancier et plongeant dans un réservoir d'eau annulaire, dont la partie centrale communique par le bas avec la galerie d'où l'air doit être extrait; les parties supérieures des cloches et des cylindres intérieurs du réservoir sont munies de soupapes qui s'ouvrent de bas en haut. Ces machines fonctionnent exactement comme les machines à piston; les cloches remplacent les pistons, et comme les parties latérales plongent toujours dans l'eau, les joints sont toujours parfaitement étanches, ce qui n'arrive pas pour les pistons ordinaires.

705. Une machine de cette espèce a été établie, d'après les indications de M. de Vaux, ingénieur en chef des mines de la province de Liége, sur la houillère de Marihaies, à Seraing-sur-Meuse. Cette machine se compose de deux cloches en tôle, de $3^m,50$ de diamètre et de $2^m,60$ de hauteur. M. Glépin a fait sur cet appareil des expériences dont je rapporterai les principaux résultats.

Le jour des expériences, la course des cloches était de $1^m,86$, le nombre des excursions, montée et descente, de 15 en 88″, et par conséquent la vitesse était de $0^m,32$; le volume d'air extrait par seconde était de $5^{mc},428$ à la température de $5°,5$ sous la pression de $0^m,7654$. Les observations des manomètres de la galerie et des cloches ont présenté des anomalies qui ne s'étaient point rencontrées dans les machines à piston; ils éprouvaient des variations considérables en sens contraire, résultant des oscillations qui se produisaient, dans le vase annulaire plein d'eau, par les mouvements beaucoup trop rapides de la cloche. Par exemple, pour une des cloches, pendant son ascension, les indications du manomètre de la galerie ont été de $0^m,125$, $+ 0^m,01$, $- 0^m,030$, $+ 0^m,17$. M. Glépin a calculé le travail produit en prenant les moyennes des indications manométriques; il l'a trouvé égal à 0,396 du travail moteur; mais, comme les variations en sens contraire étaient considérables, que les durées des pressions dans les deux sens n'étaient pas connues, on ne peut réellement rien déduire des expériences.

706. Le docteur Arnott a employé, pour la ventilation de l'hôpital d'York, un appareil à cloche plongeante disposé de manière qu'une même cloche produisait en même temps l'appel et l'expulsion de l'air. Le cylindre extérieur du réservoir d'eau était prolongé en dessus et en dessous d'une longueur à peu près égale à la course de la cloche, mais par un prisme à un grand nombre de faces; le prisme supérieur était fermé en dessus et percé d'un orifice seulement suffisant pour laisser passer la corde de suspension de la cloche; le prisme inférieur s'appuyait sur le sol; les parties latérales des deux prismes étaient percées d'un grand nombre d'orifices rectangulaires étroits (la plus grande dimension étant horizontale), et fermés par des lames de toile cirée fixées à la partie supérieure. En dessus et en dessous, la moitié des orifices débouchait dans le canal d'appel, et les toiles étaient fixées en dedans, les autres débouchaient dans l'air, et les toiles étaient placées en dehors. La cloche était équilibrée en partie par un contre-poids, et son mouvement ascensionnel résultait de la charge d'une colonne d'eau d'une très-grande hauteur pressant sur un piston placé dans un petit cylindre fixe, dont la tige agissait sur la traverse à l'extrémité de laquelle la cloche était suspendue. Lorsque le piston et la cloche étaient arrivés au sommet de leur course, l'eau du cylindre s'écoulait; la communication avec le tuyau de descente était interceptée, et la cloche descendait sollicitée par son poids. La cloche étant arrivée au sommet de sa course, l'eau entrait dans le cylindre et faisait remonter le piston et la cloche. Il résulte évidemment de cette disposition que l'appel et la sortie de l'air avaient lieu simultanément pendant l'ascension et la descente de la cloche, et qu'on pouvait donner aux orifices d'appel et de sortie de grandes dimensions; mais les toiles cirées doivent absorber une assez grande force pour se soulever, et ne peuvent fermer qu'imparfaitement les orifices. Elles doivent, en outre, s'user rapidement dans les lignes de flexion. Cet appareil a d'ailleurs l'inconvénient de tous ceux dans lesquels la cloche plonge dans l'eau; la vitesse doit être très-petite, pour ne pas agiter sensiblement le liquide. Je n'ai pu me procurer aucun renseignement sur l'effet utile de cet appareil.

707. Les appareils destinés à produire une ventilation mécanique sont, comme nous l'avons vu, nombreux et de systèmes très-divers. M. Émile Harzé donne dans le tome XXVII de la *Revue universelle de M. de Cuyper*, nn tableau indiquant la répartition des ventilateurs employés dans les mines de Belgique en 1865. Voici ce tableau :

Ventilateurs A mouvement alternatif	à pistons verticaux	1
	à cloches	»
	à piston horizontal (système Mahaut)	5
A rotation	Fabry	104
	Fabry, modifié par M. Sadin	»
	Lemielle	20
	Guibal (tambour avec hélice tournant dans l'eau)	»
A force centrifuge	à ailes planes (système Letoret) enveloppé ou non enveloppé	9
	à ailes planes ou légèrement courbes, enveloppé, avec vanne et cheminée d'épanouissement (système Guibal)	28
	à ailes planes et enveloppe mobile (système Lambert)	5
	à ailes courbes (système Combes)	»
A vis	Lesoinne	15
	Pasquet	8
	Motte	5
		240

Depuis cette époque, la situation s'est considérablement modifiée ; l'extension de l'aérage des mines et l'augmentation du volume d'air circulant sont les plus puissants moyens d'attirer et de retenir les ouvriers mineurs, par suite des garanties de sécurité qu'elles leur offrent. Aussi, le ventilateur Fabry, qui jouissait d'une très-grande vogue, a été peu à peu abandonné, parce qu'il ne peut fournir qu'un volume d'air relativement limité ; il n'en est pas de même du ventilateur Guibal qui tend à se substituer partout aux différents modes de ventilateurs employés; actuellement le nombre des ventilateurs Guibal en fonction est : En Belgique, de 81 ; en France de 73 ; en Allemagne, de 34. En Angleterre, on a eu d'abord beaucoup de peine à le faire adopter. De nombreuses discussions ont eu lieu à son sujet, notamment à la Société des ingénieurs de Newcastle ; il en est sorti triomphant ; les foyers, si préconisés dans ce pays, sont généralement abandonnés, et le nombre des ventilateurs Guibal fonctionnant maintenant en Angleterre n'est pas moindre de 150.

CHAPITRE VII

Ventilation par jet de vapeur.

708. Les phénomènes qui se produisent lorsqu'on lance un jet de vapeur dans une cheminée, dans le sens du mouvement qu'il faut imprimer à l'air, sont extrêmement compliqués, à cause de la détente de la vapeur, du refroidissement et de la condensation provenant de cette détente et de l'échauffement de l'air.

M. Glépin, dans son mémoire *Sur les appareils employés dans la ventilation*, a donné les résultats d'un grand nombre d'expériences faites sur ce sujet. Je les rapporterai avec quelques détails.

709. La disposition employée était celle de M. Méhu, ancien élève de l'École des mineurs de Saint-Étienne. Cet appareil, représenté en coupe verticale (*fig.* 117), se compose de six tuyaux en tôle T, T...,

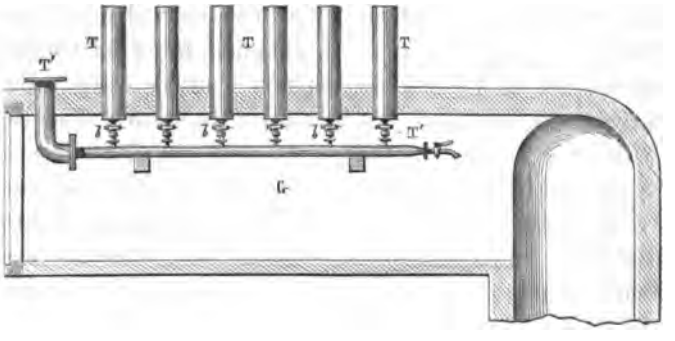


Fig. 117.

encastrés verticalement dans le toit de la galerie G qui aboutit au sommet du puits d'aérage ; six buses en cuivre *b*, *b*... servent à lancer la vapeur amenée par un tuyau T'T', au centre de chaque tuyau T. L'appareil était appliqué à la ventilation d'un puits du charbonnage du Grand-Hornu. L'effet utile a été mesuré en faisant varier successivement le diamètre et la longueur des tuyaux de tôle et la forme des orifices d'écoulement de la vapeur.

710. Dans une première expérience, les tuyaux avaient $1^m,33$ de hauteur et $0^m,45$ de diamètre ; la vapeur s'écoulait par une buse annulaire dont les deux cylindres avaient 7 et 9 millim. de diamètre, et

dont la section était d'un centim. carré. La pression de la vapeur près des orifices d'écoulement était de 5 atmosphères, et le volume d'air appelé par seconde, de $1^{mc},301$, à la température de 20°, et sous la pression de $0^{m},7537$. L'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure, dans la galerie où se trouvait l'appareil, était de $0^{m},12$ en eau, équivalente à une colonne de $10^{m},11$ en air saturé de vapeur d'eau et dans les conditions de l'observation. D'après cela, le travail produit était égal à $1,301.\ 1^{k},185.\ 10^{m}11, = 15^{km},586$, ou en chevaux-vapeur de 0,207. La quantité de vapeur consommée étant correspondante à peu près à une machine de 11,205 chevaux, l'effet utile était seulement égal à 0,018 de la force motrice dépensée. La longueur des tuyaux étant réduite à 1 m., la dépression intérieure a été réduite à $0^{m},007$.

711. Dans une seconde expérience, les tuyaux avaient 1 m. de longueur et $0^{m},20$ de diamètre ; les buses avaient $0^{m},006$ de diamètre intérieur; la pression de la vapeur était toujours de 5 atmosphères. Le volume d'air appelé par seconde était de $1^{mc},616$ à 6°, sous la pression de $0^{m},7536$. La dépression intérieure était de $0^{m},0165$ en eau, et en air de $13^{m},2$; et le travail produit $1,616.1,25.13,2 = 26^{k},66$; ou 0,355 en chevaux-vapeur. La dépense en vapeur étant équivalente à 6,40 chevaux-vapeur, le travail utile était égal à 0,054 du travail dépensé.

712. Dans une troisième expérience, les tuyaux avaient 1 m. de longueur sur $0^{m},30$ de diamètre ; les buses et la pression de la vapeur étaient les mêmes que dans l'expérience précédente. Le volume d'air appelé était de $1^{mc},310$ par seconde à la température de 8°,5 et sous la pression de $0^{m},7542$. La pression extérieure avait sur la pression intérieure un excès de $0^{m},012$ en eau, et en air de $9^{m},676$, et le travail produit était de $1,31.\ 1^{k},24.\ 9,676 = 15^{km},717$, ou 0,209 de cheval-vapeur ; la consommation de vapeur étant la même que dans l'expérience précédente, le travail utile était égal à 0,032 du travail dépensé.

713. Enfin dans une quatrième expérience les tuyaux avaient 1 m. de longueur, $0^{m},15$ de diamètre ; les buses étaient les mêmes ; le volume d'air appelé fut de $1^{mc},522$ par seconde, à la température de 10°,5 sous la pression de $0^{m},7548$; l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure était de $0^{m},015$ en eau, de $12^{m},14$ en air, et le travail produit de $1,522.\ 1^{k},235.\ 12,14 = 22^{km},819$, ou de 0,304 cheval-vapeur ; la tension de la vapeur étant toujours de 5 atmosphères, le travail produit était égal à 0,047 du travail dépensé.

D'après l'avis de M. Pelletan, les buses annulaires ont été remplacées par des buses coniques à bords tranchants, et les expériences ont été reprises en employant le même appareil dans les mêmes circonstances, la pression de la vapeur dans le voisinage des jets étant toujours de 5 atmosphères, et en faisant varier les hauteurs et les diamètres des tuyaux, ainsi que les diamètres des buses. Le tableau suivant représente les résultats des expériences.

TUYAUX D'INJECTION.		DIFFÉRENCES DE PRESSIONS EN HAUTEUR D'EAU.		
DIAMÈTRES.	HAUTEURS.	JET DE 0m,01 de diamètre.	JET DE 0m,02.	JET DE 0m,03.
0m,20	1m 00	0,00325	0,00700	0,00975
	2, 00	0,00450	0,00825	0,01300
	2, 50	0,00400	0,00950	0,01500
0m,30	1, 00	0,00500	0,01200	0,02050
	2, 00	0,00750	0,01800	0,02900
	2, 50	0,00850	0,02000	0,03400
0m,40	0, 84	0,00350	0,00700	0,01100
	1, 68	0,00800	0,02100	0,03700
	2, 50	0,00900	0,02700	0,05000
0m,45	0, 83	0,00300	0,00900	0,00950
	2, 00	0,00850	0,02550	0,04300
	2, 50	0,00975	0,03000	0,05600
	3, 00	0,00900	0,02800	0,05150
0m,50	0, 84	0,00350	0,00600	0,00875
	2, 00	0,00900	0,02575	0,01900
	2, 50	0,01050	0,02800	0,05300
	3, 00	0,01000	0,03100	0,06000
	3, 50	0,01000	0,03200	0,05800
0m,55	2, 00	0,00850	0,02400	0,03800
	2, 50	0,00850	0,02800	0,05200
	3, 00	0,00950	0,03100	0,06000
	3, 50	0,00850	0,03200	0,05800

714. Il résulte de ce tableau un fait important, c'est l'influence de la longueur du tuyau, que l'on comprend du reste facilement; mais ce qu'il était difficile de prévoir, c'est que la limite de longueur a été dépassée pour plusieurs diamètres de tuyaux.

715. M. Glépin a déterminé l'effet utile produit par un jet de vapeur, à 5 atmosphères, s'écoulant par un ajutage de 0m,03 de diamètre avec des tuyaux de 0m,50 de diamètre et de 3 mètres de longueur. Le volume d'air écoulé était de 3mc,285 par seconde, à la température de 17°, sous la pression de 0m,7615 ; et l'excès de pres-

sion intérieure de $0^m,0575$ en eau, et en air de $47^m,31$; le travail produit était alors de $3,285.\ 1^k,214.\ 47,31 = 188^{km}$, ou 2,5 chevaux-vapeur ; et comme la quantité de vapeur employée correspondait à 36 chevaux, le travail produit était égal à 0,069 du travail dépensé.

716. Les rapports correspondants pour les autres tuyaux peuvent se déduire de cette dernière expérience ; car, l'effet produit étant proportionnel au carré de la vitesse multiplié par le poids de l'air appelé, ou sensiblement par la vitesse, puisque les sections ne changent pas et que la température varie peu, cet effet est à peu près proportionnel à la puissance $\frac{3}{2}$ de la dépression ; en prenant alors pour les différents diamètres des tuyaux les dépressions maximum, on trouve que les effets produits pour les douilles de $0^m,01$; $0^m,02$; $0^m,03$ sont proportionnels aux nombres donnés par le tableau suivant :

Pour les cylindres de	$0^m,20$	0,000318	0,00095	0,00183
— —	$0^m,30$	0,000815	0,00280	0,00620
— —	$0^m,40$	0,000850	0,00465	0,01110
— —	$0^m,45$	0,000950	0,00519	0,01320
— —	$0^m,50$	0,001000	0,00572	0,01460
— —	$0^m,55$	0,000925	0,00572	0,01460

717. Remarquons maintenant que, pour comparer les effets produits avec celui dont il vient d'être question, il faut d'abord les ramener à la même dépense de vapeur ; or, la pression ayant été constante, les dépenses de vapeurs sont proportionnelles aux surfaces des douilles ; par conséquent, les nombres de la première rangée verticale devront être multipliés par 9, et ceux de la seconde par $9 : 4 = 2,25$; si on divise chacun de ces produits par 0,0146 qui correspond à la dernière expérience, et si on multiplie le quotient par 0,069, on aura les rapports des effets produits à ceux qui résulteraient de la vapeur consommée. C'est ainsi qu'on a obtenu les nombres suivants :

Cylindres de	$0^m,20$	0,0131	0,0191	0,0086
—	$0^m,30$	0,0345	0,0562	0,0292
—	$0^m,40$	0,0361	0,0917	0,0520
—	$0^m,45$	0,0405	0,1030	0,0620
—	$0^m,50$	0,0425	0,1145	0,0690
—	$0^m,55$	0,0393	0,1145	0,0690

Il résulte, de ce dernier tableau, que le maximum d'effet utile aurait

lieu pour des tuyaux de $0^m,50$ à $0^m,55$ de diamètre, pour des hauteurs de 3 m. à $3^m,50$, et qu'il s'élèverait à 0,1145.

718. M. Glépin donne, dans son ouvrage, les résultats de plusieurs expériences faites sur la ventilation des puits d'aérage et des cheminées par des jets de vapeur ; tous correspondent à des effets utiles très-petits. Je rapporterai seulement les expériences qui ont été faites sur la cheminée de la fosse n° 6 du Grand-Hornu.

Cette cheminée communique avec la fosse aux échelles attenante à la fosse d'extraction ; elle a 39 mètres de hauteur sur $1^m,41$ de section, et on brûle dans le foyer latéral 50 kilog. de très-mauvaise houille par heure. L'action du foyer seul produisait un appel de $1^{mc},228$ d'air par seconde, à la température de $3°,75$; l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure était de $0^m,012$ en eau, et en air de $9^m,3$; alors le travail effectué était de $1,228. 1^k,29. 9,3 = 14^{km}$, ou 0,196 de cheval-vapeur. En faisant agir en même temps, sous une pression de 2,75 atmosphères, un jet de vapeur qui dépensait une quantité de vapeur correspondante à la force d'un cheval, le volume d'air écoulé était de $1^{mc},524$ par seconde et l'excès de pression de $0^m,013$ en eau, ou de $10^m,077$ en air ; on avait ainsi pour le travail effectué $1,524. 1^k,29. 10,077 = 19^{km},81$, ou 0,264 de cheval-vapeur. L'accroissement de travail était donc de $0,264 - 0,196 = 0,068$, et comme la dépense en vapeur correspondait à un cheval, l'effet utile de l'injection de vapeur était 0,068 du travail dépensé.

719. On voit, par les expériences que nous venons de rapporter, que l'effet utile d'un jet de vapeur, pour produire le tirage dans une cheminée, est très-faible, qu'il est bien inférieur, même dans les circonstances les plus favorables, aux plus mauvaises machines. Mais il est probable que si la vapeur était lancée par intermittence comme dans les locomotives, l'effet utile serait augmenté.

Il est possible que, lorsque les jets sont continus, la vapeur agisse en se détendant dans le tuyau et en produisant par suite un appel, comme quand un courant d'air, dirigé par un tuyau, pénètre dans un autre d'un plus grand diamètre, tandis que, lorsque les jets sont intermittents, elle agit comme un piston. Mais ce ne sont là que des suppositions qu'il importerait beaucoup de vérifier directement.

D'après les expériences de MM. Flachat et Petiet, le travail, produit par les injections intermittentes de vapeur dans la cheminée des locomotives, varie de 0,5 à 0,16 du travail que la vapeur pourrait produire.

720. Les conséquences qu'il est permis de tirer des travaux dont nous venons de parler sont très-limitées, la pression de la vapeur dans les expériences étant toujours restée la même ; d'ailleurs, les nombres obtenus seraient difficilement applicables au cas du tirage forcé employé dans les locomotives.

MM. Nozo et Geoffroy, anciens élèves de l'École Centrale, ont fait sur ce sujet des expériences nombreuses, dont les résultats ont été publiés dans les *Mémoires et comptes rendus des travaux de la société des Ingénieurs civils*, 16e année.

L'appareil qui a servi aux expériences se compose d'une boîte ayant une capacité de 120 litres placée verticalement près d'une chaudière de locomobile servant de générateur pour la vapeur. Cette boîte est reliée à la boîte à fumée de la locomotive par un conduit de 1 mètre de longueur et de $0^m,25$ de diamètre dans lequel on mesure la vitesse des gaz chauds aspirés de la boîte à fumée, à l'aide d'un anémomètre placé au milieu du conduit ; une vitre placée en face de l'anémomètre permet d'en lire les indications. Entre la boîte principale et le conduit on a interposé, dans les différentes expériences, diverses plaques de tôle percées de trous de même diamètre, mais en nombre différent, et uniformément répartis sur la surface de chaque plaque de manière à composer diverses sections de passage aux gaz aspirés.

La face supérieure de la boîte est percée d'un orifice à bride sur laquelle on peut placer successivement des cheminées de diverses sections ; ces cheminées sont formées d'anneaux cylindriques en tôle glissant à frottement les uns dans les autres, de manière à faire varier facilement les hauteurs.

La face inférieure de la boîte à fumée est traversée par un tuyau d'échappement qui glisse à frottement doux dans son emmanchement, pour modifier à volonté la distance de l'orifice d'échappement à celui de la cheminée ; la partie supérieure du tuyau d'échappement est filetée pour recevoir des cônes d'échappement de section différente.

Le tuyau d'échappement communique avec un réservoir spécial d'une capacité de 320 litres, que nous appellerons *réservoir d'échappement*, et dans lequel la pression de la vapeur est maintenue rigoureusement constante, pendant toute la durée de chaque observation, au moyen d'une vanne placée sur le tuyau qui amène la vapeur du régulateur de la locomotive, et d'un robinet placé sur le réservoir d'échappement.

Un manomètre à mercure indique la pression dans le réservoir d'échappement, un autre manomètre fournit la dépression dans la boîte principale.

La température des gaz est fournie par un thermomètre placé à demeure.

Le poids de la vapeur dépensée est calculée par la formule

$$Q = 0{,}9Sp\sqrt{2g\frac{P}{p}}$$

dans laquelle P est la pression génératrice par mètre carré, p le poids du mètre cube de vapeur qui s'écoule et S la section de l'échappement.

721. En faisant varier la longueur d'une cheminée pour une section donnée de passage des gaz et de l'échappement de la vapeur, on a reconnu que pour une section donnée de la cheminée, on obtient le maximum de tirage quand la hauteur de la cheminée a environ 7 fois la longueur de son diamètre.

En employant des échappements dont les diamètres variaient de $0^m,010$ à $0^m,040$, et ces échappements étant placés à des distances diverses de l'entrée de la cheminée, on a reconnu que la distance pour laquelle la quantité d'air appelé reste constante est comprise entre les chiffres suivants :

$0^m,500$	à	$0^m,650$	pour une cheminée de	$0^m,280$	de diamètre.
$0^m,300$	à	$0^m,400$	— —	$0^m,143$	—
$0^m,110$	à	$0^m,150$	— —	$0^m,101$	—
$0^m,070$	à	$0^m,080$	— —	$0^m,071$	—
$0^m,050$	à	$0^m,070$	— —	$0^m,050$	—
$0^m,020$	à	$0^m,070$	— —	$0^m,035$	—

Si l'on dépasse ces distances, la quantité d'air appelé décroît très-rapidement.

722. — TABLEAU donnant les résultats des expériences de MM. Nozo et Geoffroy, sur le tirage par jet de vapeur.

OBSTACLE au passage de la fumée. — Désignation.	OBSTACLE au passage de la fumée. — Section de passage.	Section de l'échappement.	Pression motrice de la vapeur en millimètres de mercure.	Poids de la vapeur écoulée par seconde.	Section de la cheminée qui donne le maximum d'appel.	Dépression dans la boîte à fumée en millimètres d'eau.	Poids d'air appelé par seconde en grammes.	Poids d'air aspiré par seconde et par mètre carré de la section de passage. — Observé.	Poids d'air aspiré par seconde et par mètre carré de la section de passage. — Calculé.	Rapport de la section de la cheminée à la section d'échappement.	Rapport de la section de passage à la section de l'échappement.	Rapport du poids d'air appelé au poids de vapeur dépensée.
							gr.	k				
Plaque percée de 20 trous de 0m,009 de diamètre.	0,001272	0.000628	50	51.54	0.0036	82	41.03	35.485	35.485	5.74	2.00	0.800
			200	110.35		337	91 12	72.524	71.78	»	»	0.825
			400	170.40		663	115.75	90.982	81.52	»	»	0.675
			600	225.90		786	125.00	94.458	95.87	»	»	0.555
		0.000314	50	25.77	0.0034	60	37.25	29.280	27.21	10.81	4.00	1.444
			200	55.17		253	71.92	55.982	46.31	»	»	1.016
			600	112.93		650	111.35	87.624	73.54	»	»	0.988
		0.000157	50	12.88	0.0025	32	27.62	21.621	21.92	15.92	8.00	2.150
			200	27.08		135	55.25	43.435	38.18	»	»	2.050
			600	56.47		384	92.42	72.732	59.15	»	»	1.640
		0.000078	50	6.44	0.0022	23	»	»	17.02	28.20	16.00	»
			200	13.54		80	41.20	32.385	29.61	28.20	»	3.042
			600	28.23		206	67.19	52.983	46.08	»	»	2.376
Plaque percée de 40 trous de 0m,009 de diamètre.	0,00544	0.000628	50	51.54	0.0055	65	70.04	27.521	28.36	8.80	4.00	1.360
			200	110.35		202	108.51	42.625	49.38	»	»	0.983
			600	225.90		682	162 75	63.995	76.62	»	»	0.740
		0.000314	50	25.77	0.0047	42	62.43	24.682	22.19	14.99	8.00	2.426
			200	55.17		174	111.52	43.621	38.63	»	»	2.030
			600	112.95		435	148.75	58.395	59.95	»	»	1.522
		0.000157	50	12.88	0.0045	26	46.14	18.134	17.37	25.49	16.00	3.755
			200	27.08		100	83.69	32.892	27.58	»	»	3.085
			600	56.47		256	128.82	50.629	46.95	»	»	2.295
		0.000078	50	6.44	0.0032	17	35.20	13.832	13.75	41.00	32.00	5.442
			200	13.54		48	65.85	25.682	23.94	»	»	4.835
			600	28.23		135	100.28	39 410	37.16	»	»	3.554
Plaque percée de 160 trous de 0m,009 de diamètre.	0,010178	0.000628	50	51.54	0.0145	27	170.32	16.753	17.71	23.15	16.00	3.315
			200	110.35		84	295.04	29.000	30.84	»	»	2.675
			600	225.90		255	488.31	48.012	47.86	»	»	2.156
		0.000314	50	25 77	0.0135	18	148.60	14.632	13.61	43.12	32.00	5.721
			200	55.17		60	235.12	23.150	23.70	»	»	4.255
			600	112.95		153	357.74	38.195	36.79	»	»	3.445
		0.000157	50	12.88	0.0130	12	114.87	11.284	10.40	82.81	64.00	8.852
			200	27.08		32	184.60	18.200	19.84	»	»	6.832
			600	56.47		79	280.20	27.519	28.10	»	»	4.976
		0.000078	50	6.44	0.0120	7	69.26	6.819	7.99	154.00	128.00	10.783
			200	13.54		14	131.23	12.932	13.60	»	»	9.712
			600	28.23		37	194.24	19.145	21.61	»	»	6.885
Plaque percée de 320 trous de 9mm de diamètre.	0,020355	0.000078	50	6.44	0.0250	6	104.58	5.162	6.01	320.12	256.00	16.270
			200	13.54		10	178.03	8.868	10.47	»	»	13.162
			600	28.23		19	310.65	15.258	16.25	»	»	11.000

723. En faisant varier le diamètre de la cheminée dont la hauteur reste égale à 7 fois son diamètre environ, la section de passage et la section d'échappement restant constantes, on a vu, ce qu'on peut constater au tableau qui résume les résultats de l'expérience, qu'il y a une section de cheminée qui donne le maximum de tirage, et que cette section est indépendante de la pression de la vapeur.

Pour déterminer cette section qui donne le maximum d'appel, on employait 10 cheminées dont les sections variaient de $0^m,202$ à $0^m,035$ et dont les hauteurs variaient de $1^m,600$ à $0^m,300$.

La quantité d'air appelé et la dépression dans la boîte augmentent avec la pression dans le réservoir d'échappement, mais le rapport du poids d'air appelé au poids de vapeur dépensée diminue.

En examinant les nombres du même tableau, on voit que la section de passage et la pression de vapeur dans le réservoir d'échappement étant constantes, la cheminée qui fait produire pour chaque section d'échappement le maximum d'appel diminue un peu quand la section d'échappement diminue ; mais que pour des variations de cette section qui varient du simple au double, la section de la cheminée qui fournit le maximum d'appel reste à peu près constante.

Enfin, toujours en se référant au tableau précité, on trouve que la section d'échappement et la pression de la vapeur, dans le réservoir restant constantes, la section de la cheminée qui fournit le maximum d'appel est sensiblement proportionnelle à la section de passage des gaz.

724. Il était intéressant de comparer les effets qu'on obtiendrait en remplaçant une seule cheminée par un certain nombre de cheminées dont la somme des sections serait la section de la cheminée unique, en employant des échappements dont la somme des sections serait aussi égale à la section de l'échappement fonctionnant dans la cheminée unique.

Voici le tableau des conditions de l'expérience comparative :

	SECTION DE PASSAGE de l'air aspiré.	DIAMÈTRE des échappements.	DIAMÈTRE des cheminées.	HAUTEUR des cheminées.
Cheminée et échappement uniques;	160 trous de 9mm	40mm	149mm	1m,120
8 cheminées, 8 échappements.....	de diamètre...	14mm	50,5	0m,400

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau suivant :

PRESSION DE LA VAPEUR en MILLIMÈTRES DE MERCURE.	DÉPRESSION en millimètres d'eau.		POIDS EN GRAMMES de l'air aspiré.	
	Cheminée unique.	Cheminées multiples.	Cheminée unique.	Cheminées multiples.
300	141	119	384	368
200	93	75	327	295
100	43	40	217	209
50	28	20	150	153

On voit que la quantité d'air appelé reste sensiblement la même p our une cheminée unique ou pour uncertain nombre de cheminées, pourvu que la section totale soit la même.

725. Nous avons essayé de représenter, par une formule aussi simple que possible, les quantités d'air écoulées dans les différentes conditions de l'expérience.

Si l'on représente par p la pression de la vapeur dans le réservoir d'échappement en millimètres de mercure ; par a le rapport de la section de la cheminée à la section d'échappement, et par b le rapport de la section de passage à la même section d'échappement, on aura sensiblement, pour représenter le poids d'air appelé par seconde et par mètre carré de la section de passage, la formule suivante :

$$P = 12{,}09\sqrt[5]{\frac{p^2}{ab}}.$$

Les résultats tirés de cette formule sont relatifs à la cheminée qui fournit le maximum d'appel.

Nous avons introduit dans le tableau les valeurs calculées au moyen de cette formule à côté de celles qui sont fournies par l'observation. Il va sans dire que cette formule n'est applicable que pour le cas particulier dans lequel elle a été établie ; on doit cependant la considérer comme suffisamment approchée dans le cas des chaudières tubulaires à tirage forcé.

726. MM. Nozo et Geoffroy ont complété leurs recherches par l'examen de ce qui se passe dans une locomotive.

Ils ont d'abord cherché si, dans ce cas encore, il y a lieu de considérer une section qui donne le maximum de tirage. La machine locomotive marchait, dans les essais, de Paris à Pontoise ; elle était pourvue d'un échappement fixe de $0^m,110$ de diamètre et par conséquent de $0^m,009503$ de section, placé à $0^m,100$ de l'orifice inférieur de la cheminée ; on a essayé successivement 6 cheminées dont les diamètres respectifs étaient :

Cheminée n° 1.....	$0^m,16$	de diamètre.
— 2.....	$0^m,14$	—
— 3.....	$0^m,12$	—
— 4.....	$0^m,10$	—
— 5.....	$0^m,08$	—
— 6.....	$0^m,06$	—
— 7.....	$0^m,04$	—

Avec les cheminées n° 2, 3, 4 et 5 on a facilement marché ; avec les cheminées 1 et 6, le tirage était insuffisant ; avec la cheminée 7, la marche était impossible. Les cheminées 3, 4 et 5 recevaient une quantité de vapeur surabondante ; c'est donc un diamètre qui se rapproche de celui de la cheminée n° 4 qui donne le maximum de tirage.

727. Les mêmes expérimentateurs ont ensuite étudié l'action d'une *cheminée horizontale ;* ils ont vu que le tirage augmente d'abord avec la longueur et qu'il est maximum lorsque la longueur de la cheminée est de 7 à 8 fois la longueur du diamètre.

Une cheminée horizontale de 2 mètres de long avec un coude de 1 mètre n'a pas donné plus de tirage qu'une cheminée droite et horizontale de 2 mètres de long.

Le diamètre qui a donné le maximum de tirage pour une longueur de $3^m,50$ est de $0^m,45$ à $0^m,48$ aussi bien avec un échappement de $0^m,100$ de diamètre qu'avec un échappement de $0^m,125$.

728. Enfin, l'essai direct des cheminées multiples sur les locomo-

tives a fait voir qu'on obtient sensiblement le même résultat avec une cheminée unique ou avec des cheminées multiples de même section ; surtout quand on peut réduire le nombre des tubes à 2 ou 3 au plus.

729. Vers l'époque à laquelle MM. Nozo et Geoffroy faisaient les expériences que nous venons de rapporter, M. Zeuner se livrait de son côté à des recherches du même ordre. L'appareil employé était à peu près le même, sauf que M. Zeuner aspirait directement l'air extérieur ; il employait deux échappements, l'un de $0^m,01$, l'autre de $0^m,014$ de diamètre ; les diamètres des cheminées étaient de $0^m,04$; $0^m,08$; $0^m,10$; $0^m,12$; $0^m,15$, leurs longueurs pouvaient être de $0^m,185$; $0^m,375$; $0^m,750$; $1^m,125$; $1^m,500$.

L'orifice d'entrée de l'air dans la boîte qui porte la cheminée pouvait avoir les diamètres suivants : $0^m,010$; $0^m,02$; $0^m,04$; $0^m,06$; $0^m,08$.

730. Comme MM. Nozo et Geoffroy, M. Zeuner a constaté que l'influence de la distance entre l'orifice du jet de vapeur et celui de la cheminée est sensiblement nulle, pourvu que le jet de vapeur ne forme pas une nappe plus large que la section de la cheminée. La distance peut être de une à deux fois le diamètre de la cheminée.

L'influence du volume de la caisse qui porte la cheminée paraît nulle, ce qu'on a reconnu en faisant varier ce volume de 1 à 4.

D'après M. Zeuner, il y a aussi un maximum de tirage qui répond à une longueur donnée de la cheminée, seulement ce savant admet des limites plus étendues que celles fournies par MM. Nozo et Geoffroy ; d'après lui le tirage resterait le même, et maximum par conséquent, pour des longueurs de la cheminée comprises entre 3 et 30 fois le diamètre.

En faisant varier la pression de la vapeur, on trouve que la dépression π qui se produit dans la caisse croît quand la pression de la vapeur augmente et que le rapport a de la section de la cheminée à la section d'échappement diminue. π a été trouvé sensiblement proportionnel à la pression ; c'est ce qu'on peut d'ailleurs vérifier aussi sur le tableau des valeurs fournies par MM. Nozo et Geoffroy. On peut aussi sur le même tableau vérifier la diminution de la dépression quand le rapport a augmenté.

Ainsi pour la section de passage égale à 0,001272 et pour une pression motrice de la vapeur égale à 600 millimètres de mercure on a :

Pour les valeurs de a...	5,74	10,81	15,92	28,20	
— — de π...	786	650	384	206	millimètres d'eau.

Pour exprimer la quantité d'air appelé, M. Zeuner se sert de la dépression, et la formule qui donne le volume d'air froid qui entre dans la caisse est alors :

$$V = 15{,}244 S \varphi \sqrt{\pi}$$

S était la section de passage de l'air et φ un coefficient de contraction qui tient compte de toutes les résistances que subit l'air avant son introduction dans la caisse. Dans les expériences de MM. Nozo et Geoffroy, le coefficient φ varierait entre 0,175 et 0,19 et le poids de l'air appelé serait alors :

$$P = 0{,}18 \times 15{,}244 \times 1{,}3 S \sqrt{\pi}.$$

Mais la valeur de π n'étant point directement connue dans le cas où on veut calculer l'effet d'un tirage, cette formule, d'ailleurs fort simple, ne peut malheureusement être d'aucun secours.

731. Par des raisonnements et des considérations dans lesquelles nous n'avons pas à nous arrêter ici, M. Zeuner arrive à établir que si on représente par Q_1 le poids de vapeur dépensée et par Q le poids d'air appelé ; si de plus a est le rapport de la section de la cheminée à la section de l'échappement et b celui de la section de passage de l'air dans le carreau à la section de l'échappement, on aura :

$$\frac{Q}{Q_1} = k \sqrt{\frac{b^2 (a - 1)}{\varphi a^2 + b^2}}$$

φ étant un coefficient qui résulte de la contraction.

On peut faire, relativement à cette formule, une première observation, c'est que la valeur du rapport de l'air entraîné à la vapeur dépensée est indépendante de la pression de la vapeur ; or si l'on se reporte au tableau des expériences de MM. Nozo et Geoffroy, on voit que ce rapport diminue notablement quand la pression augmente et qu'il varie presque du simple au double quand la pression motrice descend de 600 à 50 millimètres de mercure. Si l'on calcule les valeurs de $\frac{Q}{Q_1}$ dans les différents cas du tableau en prenant les coefficients K et φ égaux à l'unité, on aura :

VALEURS DE a.	VALEURS DE b.	VALEURS DE $\frac{Q}{Q_1}$.
5,74	2,00	0,71
10,81	4,00	1,08
15,92	8,00	1,73

28,20	16,00	2,59
8,80	4,00	1,15
14,99	8,00	1,74
25,49	16,00	2,64
41,00	32,00	3,89
23,15	16,00	2,67
43,12	32,00	3,87
82,81	64,00	5,50
154,00	128,00	6,24
320,12	256,00	10,20

Il est facile de voir que les valeurs calculées de $\frac{Q}{Q_1}$ sont intermédiaires, sauf pour la dernière, entre les valeurs extrêmes fournies par le tableau pour les mêmes valeurs de a et de b ; quand les valeurs de a et de b sont faibles, la valeur calculée se rapproche de la plus grande valeur fournie par l'expérience ; quand a et b augmentent, cette quantité se rapproche au contraire de la valeur minimum et peut même descendre au-dessous, autrement dit la valeur de la pression pour laquelle la formule devient exacte est d'autant plus grande que les valeurs de a et de b sont elles-mêmes plus grandes.

732. On trouvera un résultat analogue si l'on applique cette formule à l'expérience de M. Glépin rapportée au n° 715. L'échappement ayant $0^m,03$ de diamètre, et le poids d'un mètre cube de vapeur à 5 atmosphères étant de $2^k,596$. On trouve que le poids de vapeur qui s'écoule par seconde est de :

$$0,9 \times 3,1416 \times 0,000225 \times \sqrt{\frac{19,62 \times 10330 \times 4}{2,596}} = 0^k,345.$$

D'un autre côté la formule

$$\frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{b^2(a-1)}{a^2+b^2}}$$

se réduit à

$$\frac{Q}{Q_1} = \sqrt{a-1}$$

par suite de la très-grande valeur de b.

On a de plus

$$a = \frac{0,50^2}{0,09^2} = 227, \quad \text{d'où} \quad \frac{Q}{Q_1} = 16,6,$$

le volume d'air écoulé par seconde étant de $3^{m3},285$, son poids sera sensiblement

$$3,285 \times 1.3 = 4^{k},27.$$

On trouvera le poids de vapeur dépensée en divisant 4,27 par 16,6, ce qui donne $0^{k},257$. Chiffre notablement plus faible que celui que fournit l'expérience, ce rapport 16,6 serait donc trop grand dans ce cas, ce qui peut provenir de différentes causes ; en effet, la résistance dans la galerie d'aérage pouvait être plus grande que celle du passage de l'air à travers une locomotive et d'autre part la cheminée pouvait n'avoir pas la section qui correspond au tirage maximum pour l'échappement employé.

733. On voit donc que la question du tirage par jet de vapeur n'est pas encore complétement résolue. Il reste à pouvoir déterminer :

1° Comment varie le rapport de la quantité d'air appelé à la quantité de vapeur dépensée quand la pression change ;

2° Quelle est la section de la cheminée qui fournit le maximum de tirage dans des conditions données soit de section de passage, soit de section de l'échappement ;

3° L'influence des résistances qui précèdent la cheminée sur la quantité d'air entraînée.

Dans le cas des chaudières tubulaires à tirage forcé on pourra se servir de la formule

$$P = 12,09 \sqrt[5]{\frac{p^3}{ab}}$$

qui donne immédiatement le poids d'air appelé, la cheminée ayant la section qui répond au maximum de tirage.

Si le tirage s'opérait sans résistance antérieure à la cheminée ou avec une résistance faible, les valeurs trouvées au moyen de cette formule, en prenant pour section de passage la section même de la cheminée, seraient insuffisantes et devraient être augmentées dans le rapport de 1,5 à 1 environ pour le cas de l'absence de résistance antérieure, et dans un rapport moindre pour les cas intermédiaires.

734. L'emploi du jet de vapeur n'est pas nécessairement limité au tirage, mais peut être aussi employé à l'insufflation.

Dès 1844, MM. Laurens et Thomas employaient, pour alimenter d'air leurs gazogènes, un *souffleur* formé d'un jet de vapeur dirigé

au centre d'une buse amenant l'air à l'appareil ; un cône placé au centre de l'échappement permettait de faire varier la quantité de vapeur injectée, et par suite de régler la marche de l'appareil.

735. L'emploi de l'injection de vapeur pour l'aspiration ou la compression du gaz a été ultérieurement traité par M. Siemens (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1873). Dans l'appareil dont il se sert, l'air pénètre dans le tube d'évacuation par deux tuyères coniques, l'une intérieure, l'autre extérieure à une troisième tuyère conique par laquelle s'échappe la vapeur ; la tuyère extérieure peut être avancée ou reculée au moyen d'une vis à main, ce qui permet de faire varier l'orifice de la vapeur. Le tuyau d'échappement conserve une forme légèrement conique suivant une certaine longueur et s'évase ensuite suivant une forme parabolique. Avec cet appareil M. Siemens a pu obtenir une dépression de $0^m,470$ de mercure ou une compression de $0^m,426$. M. Siémens indique comme applications possibles de son appareil :

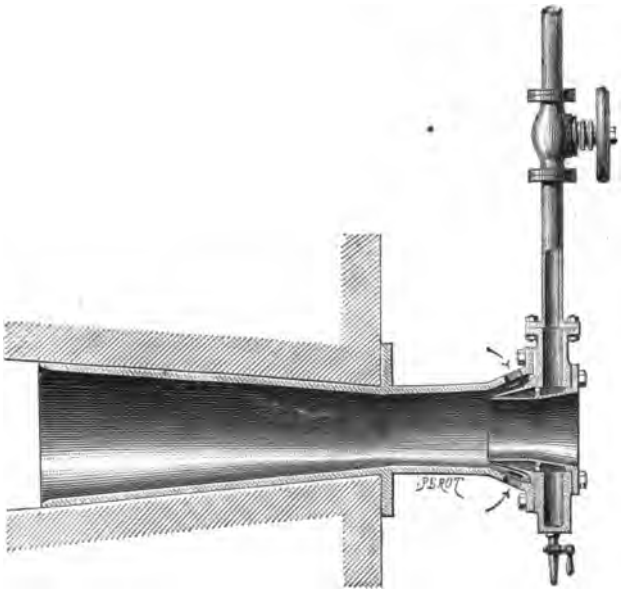


Fig. 118.

1° La transmission atmosphérique des dépêches ;
2° L'élévation de l'eau ;
3° L'évaporation dans la fabrication du sucre ;
4° Le soufflage des gazogènes Siémens.

Cette dernière application est la seule, croyons-nous, qui ait été réalisée ; la figure 118 représente l'injecteur Siémens, tel qu'il est employé dans ce cas.

Fig. 119.

736. M. E. Körting, de Hanovre, construit des *ventilateurs à jet de vapeur*, fondés sur le même principe que les appareils précédents, ils en diffèrent cependant en ce qu'ils sont formés d'une suite d'entonnoirs de plus en plus larges ; chacun d'eux pénétrant dans le suivant ; au centre du plus petit débouche un tuyau de vapeur (*fig.* 119). Nous manquons d'éléments d'expérience pour établir l'effet utile de ces divers appareils.

737. Au lieu d'employer un jet de vapeur pour produire le mouvement de l'air, on peut utiliser, par des moyens analogues, un jet d'air comprimé ; nous reviendrons, quand nous nous occuperons spécialement de la ventilation, sur cette application de l'air comprimé au tirage ou à l'insufflation.

CHAPITRE VIII

Machines soufflantes diverses.

738. Ces machines, qui ne sont guère employées que dans les travaux métallurgiques pour alimenter les foyers des fourneaux, ne peuvent qu'être indiquées dans cet ouvrage. Nous allons rapidement les passer en revue.

739. *Soufflets.* — La machine soufflante la plus ancienne est le soufflet, disposé comme le soufflet ordinaire des cheminées domestiques ; en général, il est placé horizontalement, et reçoit le mouvement d'un arbre à cames, mis en mouvement par un moteur quel-

conque. Ces machines sont à peu près abandonnées et on ne les rencontre plus que dans les forges de maréchaux.

740. *Trompes.* — On désigne sous ce nom une machine soufflante composée d'un arbre creux vertical, communiquant par sa partie supérieure avec un réservoir d'eau et par sa partie inférieure avec une caisse fermée, qui porte un tuyau destiné à faire écouler l'air comprimé. Le conduit intérieur de l'arbre est étranglé un peu au-dessous du réservoir supérieur, et il est percé de plusieurs orifices qu'on désigne sous le nom d'*aspirateurs*. Lorsque l'eau pénètre dans la trompe, elle produit par les aspirateurs un appel de l'air extérieur, qui est entraîné par l'eau et se dégage ensuite sous une certaine pression, pour s'écouler par le tuyau monté sur la caisse inférieure. Afin de faciliter le dégagement de l'air, l'eau tombe sur une plaque horizontale placée dans la caisse, et s'écoule ensuite par un orifice latéral percé près du fond.

La théorie de ces machines n'est pas connue, et on ignore par conséquent les dimensions les plus convenables à donner aux différentes parties qui les composent. Leur effet utile est compris entre 0,10 et 0,15. Elles sont employées à cause de leur grande simplicité, mais seulement dans les pays de montagnes, où l'on a à sa disposition de nombreuses chutes d'eau.

741. *Cagniardelles.* — On appelle ainsi une vis d'Archimède qui tourne en sens contraire de celui qu'il faut lui imprimer pour faire monter l'eau. Par ce mouvement, l'air descend dans la vis et s'écoule par un tuyau placé à la partie inférieure. C'est M. Cagniard-Latour qui a eu le premier l'idée d'utiliser la vis d'Archimède comme machine soufflante. Ces machines sont à peu près abandonnées.

742. *Machines soufflantes à piston.* — Les premières machines de ce genre qui remplacèrent les soufflets (739), consistaient en deux caisses carrées en bois dont les pistons étaient mus par des cames. Chaque caisse était à simple effet. Le médiocre rendement de cet appareil et l'augmentation de pression de l'air nécessitée par l'introduction du combustible minéral dans la métallurgie, ainsi que l'amélioration des constructions mécaniques, ont amené depuis longtemps déjà l'emploi des souffleries à cylindres en fonte et à double effet. Les cylindres étaient d'abord munis, pour l'appel et la sortie de l'air, de clapets placés dans des boîtes fixées aux parois, ou aux fonds des cylindres. La grandeur et le poids de ces clapets, leur mode de fonctionnement, ne permettaient pas de donner à ces machines une grande vélocité, qui d'ailleurs aurait encore accru la

perte de travail due au soulèvement des clapets, de sorte que ces soufflerie étaient volumineuses et coûteuses. MM. Laurens et Thomas ont d'abord substitué aux anciens clapets des séries de petits clapets légers, offrant une plus grande section, lesquels permirent déjà une accélération sensible de la vitesse, et ces ingénieurs parvinrent à l'augmenter encore en remplaçant les clapets par un système de tiroirs à découvert, mis en mouvement par le moteur lui-même : avec ce système, de puissantes soufflerie ont pu être réglées à 60 tours par minute. Les frais d'installation des machines vives sont évidemment inférieurs de beaucoup à ceux des machines plus ou moins lentes. Une bonne exécution, jointe à un mode de commande simple par le moteur, en assure la durée.

Pour obtenir des soufflerie à tiroir la meilleure utilisation possible, il est de toute nécessité de donner aux lumières des cylindres soufflants les proportions convenables et aux tiroirs à vent un règlement particulier, qu'on peut dire inverse de celui du tiroir du cylindre à vapeur qui opère la commande directe. Nous laissons aux traités spéciaux l'étude complète de ces installations.

CHAPITRE IX

Ventilation par un travail accumulé.

743. Pour terminer ce qui regarde la ventilation mécanique, il me reste à dire quelques mots de la ventilation par un travail accumulé. Quand l'air ne doit recevoir qu'une faible vitesse et qu'il n'éprouve que peu de résistance, le travail nécessaire à son mouvement étant très-faible, on pourrait en quelques heures produire une certaine quantité de travail, qu'on dépenserait ensuite lentement dans un temps beaucoup plus long. Supposons, par exemple, que nous ayons à produire une ventilation de 1000 mètres cubes d'air par heure, que la vitesse d'écoulement dans la cheminée d'évacuation doive être de 1 m. par seconde, et que les résistances de toute espèce réduisent la vitesse au tiers de ce qu'elle serait sans ces résistances. Le travail à dépenser sera le même que s'il n'y avait pas de résistance, et si la vitesse d'écoulement était de 3 m. ; le travail par seconde $pv^2 : 2g$ sera donc

$$\frac{1000 \cdot 1{,}3}{3600} \cdot \frac{9}{19{,}62} = 0^{km},165 ;$$

pour 10 heures, le travail serait égal à $0{,}165.3600.10 = 5945^{km}$. Or, le travail d'un homme, par seconde, est à peu près de 7^{km}, et par heure de $7.3600 = 25200$: ainsi un homme, dans un travail d'une heure, pourrait produire à peu près 4 fois plus de travail que le ventilateur ne doit en consommer; alors si un homme, ou deux hommes au besoin, étaient employés à élever pendant une heure un certain poids, qui descendrait ensuite lentement pendant 10 heures, le travail de la chute du poids pourrait produire la ventilation pendant ces 10 heures. Ce mode de ventilation mécanique conviendrait, dans un grand nombre cas, pour produire la ventilation de nuit au moyen d'un travail qui s'effectuerait de jour. L'appareil pourrait être disposé d'un grand nombre de manières : on pourrait employer la chute d'un corps solide ou de l'eau. Dans le premier cas, le corps serait élevé au moyen d'un treuil, le mouvement de descente du poids se communiquerait à un ventilateur, et on réglerait le poids et les transmissions de manière que le ventilateur eût la vitesse convenable. Dans le cas où l'on emploierait de l'eau, on pourrait la faire agir sur une petite turbine, dont l'axe porterait le ventilateur. On pourrait aussi employer la disposition du docteur Arnott, dont il a été question précédemment (706). On obtiendrait de semblables résultats en faisant tomber l'eau sous forme de pluie dans un canal vertical, qui communiquerait par la partie supérieure avec l'espace à ventiler, et par la partie inférieure avec la cheminée d'évacuation.

LIVRE V

DES FOYERS.

744. Les premiers foyers qui ont été employés consistaient simplement dans un espace placé au-dessous du corps qu'on voulait échauffer, et dans lequel on accumulait le combustible. Plus tard, lorsqu'on reconnut la nécessité d'envelopper le foyer pour empêcher les pertes de chaleur, les foyers se composèrent d'un espace fermé, pourvu d'une seule ouverture pour l'introduction de l'air et du combustible. Ce ne fut que longtemps après qu'on imagina les grilles sur lesquelles on place le combustible. Il est probable que leur découverte a été provoquée par l'emploi de la houille, qui brûle mal sans grille.

745. Un foyer se compose, maintenant, de l'ouverture qui donne accès à l'air, d'un espace où se réunissent les cendres, qu'on appelle cendrier, de la grille sur laquelle on place le combustible, et d'un espace dans lequel se développe la flamme et qui constitue le foyer proprement dit. Ces différentes parties ne sont cependant pas toujours distinctes, comme nous le verrons plus tard.

Les foyers ont des formes très-variées, non-seulement à cause des qualités différentes des combustibles, mais encore pour un même combustible, suivant l'effet qu'on veut obtenir. Nous parlerons d'abord des foyers ordinaires, généralement employés dans les usines ; nous examinerons ensuite les diverses dispositions qui ont été proposées pour les améliorer, et les foyers destinés à des combustibles spéciaux.

CHAPITRE PREMIER

Des foyers ordinaires à flamme droite.

746. Les foyers sans grille ont un très-grand désavantage sur les foyers à grille, parce que, le courant d'air arrivant latéralement, une

grande partie de cet air ne traverse pas le combustible, et diminue la température des gaz produits par la combustion. Aussi, ces foyers, quoique d'une construction beaucoup plus simple que les autres, doivent être entièrement proscrits, toutes les fois que l'économie du combustible doit être prise en considération, ou que d'autres circonstances ne rendent pas leur emploi indispensable; d'ailleurs, ils ne pourraient point servir pour la houille, car la combustion y serait languissante et imparfaite.

La figure 120 représente une coupe d'un foyer ordinaire à grille. Nous allons successivement en étudier les différentes parties.

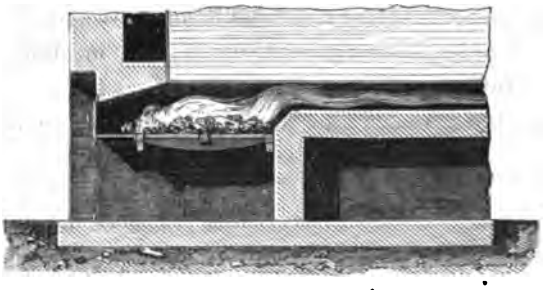


Fig. 120.

747. *Ouverture qui donne accès à l'air.* — L'orifice d'accès de l'air doit avoir une section au moins égale à celle de la cheminée mais il n'y a jamais d'inconvénient à la rendre beaucoup plus grande, et il convient de le faire, surtout si la prise d'air est extérieure, et si l'air n'arrive dans le foyer qu'après avoir parcouru un long canal.

Il est toujours utile de garnir l'ouverture du cendrier d'une porte qui puisse fermer hermétiquement. Cette porte et le registre de la cheminée, dont nous avons parlé (613), permettent d'empêcher l'air de passer à travers le fourneau pendant la cessation du travail, de s'opposer ainsi au refroidissement, et par conséquent de faire une économie notable de combustible.

En général, on peut donner aux ouvertures d'accès une position et une direction quelconques. La prise d'air peut avoir lieu en dedans ou en dehors de l'atelier; le premier cas est le plus général. L'orifice du cendrier est alors placé au-dessous de la porte du foyer; quelquefois il est au niveau du sol, et il est fermé par un grillage en fer; mais cette disposition n'est jamais employée que pour les foyers à bois, attendu qu'elle ne permet pas de nettoyer les grilles.

Quelquefois on introduit l'air par plusieurs ouvertures pratiquées

sur les faces du fourneau ; cette disposition compliquée est sans aucun avantage lorsque le fourneau se trouve dans un atelier clos, et que les orifices s'ouvrent dans l'atelier même.

748. Lorsque la prise d'air se fait au dehors de l'atelier, il en résulte plusieurs avantages importants : 1° le tirage, toutes choses égales d'ailleurs, est plus fort, parce qu'en général, la température des ateliers étant plus élevée que celle de l'air extérieur, la pression sur l'ouverture d'un canal débouchant au dehors est plus grande que celle qui se manifesterait sur une ouverture située dans l'atelier : 2° lorsque la prise d'air est intérieure, les vents dirigés en sens contraire de l'introduction de l'air dans l'atelier diminuent le tirage, et cette diminution est d'autant plus grande que le tirage est plus faible ; tandis que, par une prise d'air extérieure, on peut détruire complétement cette influence.

Lorsqu'on peut prendre l'air dans un lieu bien découvert, à une distance suffisante des bâtiments, les vents sont sans influence sur le tirage. Dans le cas contraire, il faudrait multiplier les prises, de manière que, dans toutes les directions possibles des vents, il y en eût une qui fût favorable : quatre suffiraient ; mais, comme il est rare que dans un même lieu les vents violents aient plus de deux directions différentes, en général deux prises suffisent ; et, si l'ouverture de l'atelier était déjà dans une de ces directions, une seule serait nécessaire, avec une prise dans l'intérieur de l'atelier. Nous avons décrit des appareils qui rendent les vents toujours favorables à l'introduction de l'air dans les foyers par un seul canal. Quand la prise d'air est extérieure, le canal doit avoir une grande section, surtout s'il est très-long, afin que l'air n'y prenne qu'une faible vitesse, et que le tirage ne soit pas sensiblement diminué par les frottements.

749. *Du cendrier.* — Le cendrier est l'espace libre qui se trouve au-dessous de la grille ; la grandeur de cet espace est entièrement arbitraire ; il faut seulement qu'il ne soit point étranglé, et que sa plus petite section soit suffisante pour laisser passer la quantité d'air froid nécessaire à la combustion.

750. Le fond du cendrier est souvent recouvert d'une couche d'eau de quelques centimètres. Ce petit bassin, en absorbant la chaleur rayonnante du foyer de haut en bas, et en éteignant les escarbilles à mesure qu'elles tombent, diminue beaucoup la température de la partie inférieure des grilles, ce qui les conserve plus longtemps et empêche qu'elles ne soient obstruées aussi fortement par l'adhérence des scories.

De plus, la surface de l'eau formant un miroir permet au chauffeur de constater à chaque instant et sans fatigue l'état de la grille. Enfin la vapeur d'eau qui se dégage, et qui est décomposée en traversant le foyer, donne plus de longueur à la flamme, et la maintient lorsque le charbon, transformé en coke, n'en produirait plus par un courant d'air sec. Cette disposition est surtout avantageuse dans les usines à gaz d'éclairage, où les foyers sont à une haute température. Il faut observer que la vapeur d'eau introduite ainsi dans les gaz de la combustion augmente un peu la quantité de chaleur emportée par le gaz dans la cheminée ; mais souvent cet inconvénient est largement compensé par les avantages que nous avons indiqués.

751. *Des grilles.* — Les grilles sont formées de barres de fer ou de fonte placées parallèlement. Leur épaisseur et leur écartement dépendent de la grosseur des morceaux de combustible ; car ces intervalles ne doivent pas laisser passer le combustible. Pour les grands foyers, on donne généralement aux barreaux une largeur de 3 centimètres, et on laisse entre eux un intervalle d'environ 1 centimètre : il est cependant avantageux de diminuer la largeur des barreaux et leur écartement, surtout quand on doit brûler des menus de houille, ou des combustibles qui se divisent dans le foyer à mesure que la combustion fait des progrès, et dont une partie pourrait tomber avec les cendres.

752. Lorsque les foyers sont destinés à produire une très-haute température, comme ceux des fourneaux métalliques, les grilles ont en général très-peu de durée.

753. Dans le plus grand nombre des foyers des générateurs fixes, alimentés par la houille, l'intervalle entre les barreaux est à peu près le quart de la surface de la grille, et la surface totale correspond à peu près à une consommation de 1 kilog. de houille par décimètre carré et par heure. Cependant il y a des foyers dont les grilles sont beaucoup plus grandes, et d'autres où elles sont beaucoup plus petites ; les limites extrêmes correspondent à des consommations par heure de $0^k,2$ à $1^k,5$ par décimètre carré. L'incertitude, qui existe sur les dimensions les plus convenables des surfaces des grilles et de l'épaisseur du combustible, provient de ce que ces dimensions doivent varier avec la nature du combustible et la grosseur des morceaux, et aussi de ce que l'on peut brûler la même quantité du même combusitble, dans le même temps, sur des grilles de dimensions très-inégales, par des volumes d'air très-différents, mais en produisant des effets utiles aussi très-différents. Nous reviendrons sur la ques-

tion des dimensions des grilles à houille, quand nous aurons examiné les différentes formes de foyer.

754. Pour les foyers à bois, les grilles doivent être beaucoup plus petites que pour les foyers à houille : d'abord, parce qu'il faut moins d'air pour brûler 1 kilogr. de bois que pour brûler 1 kilog. de houille ; ensuite, parce que les ouvertures ne sont pas sujettes à s'obstruer. D'après les observations de M. Édouard Kœchlin, il faut 1 mètre carré de grille, ayant un quart de surface libre, pour brûler 350 kilog. de chêne vieux par heure, ce qui fait à peu près 3 décimètres carrés pour 10 kilogr. de bois ; c'est le nombre que nous admettrons. Ces dimensions conviennent également pour la tourbe et la tannée en mottes.

Pour le coke, il faut compter sur une combustion de 3 à 4 kilog. par décimètre carré de grille.

755. Examinons maintenant la construction des grilles. Généralement les barreaux sont en fonte et ont la forme indiquée par les figures 121, 122, 123, 124, 125 ; leur hauteur est plus grande au milieu que vers les extrémités (*fig.* 121), afin qu'ils résistent mieux à la flexion ; leur épaisseur va en diminuant de haut en bas (*fig.* 125), afin de faciliter l'accès de l'air, la chute des scories et le dégorgement de la grille par une barre de fer plate et recourbée qu'on introduit en dessous à travers les barreaux ; ils sont munis, aux deux extrémités, et au milieu (*fig.* 122) quand ils ont une grande longueur, de talons dont l'épaisseur est égale à la moitié de l'intervalle qui doit les séparer ; souvent on ne met des talons que d'un côté (*fig.* 123). La figure 124 représente l'ajustement des barreaux ; ils reposent par leurs extrémités sur des sommiers ou barres de fonte ou de fer fixés dans la maçonnerie. L'épaisseur de chaque barreau à la partie supérieure varie de 15 à 30 millimètres, et, pour 1 mètre de longueur, la hauteur au milieu est de 8 à 10 centimètres. Il est évident qu'on doit ménager aux extrémités de la grille un jeu suffisant pour qu'elle puisse se dilater librement. On estime ce jeu à 1 : 24 de la longueur des barreaux.

Fig. 121.

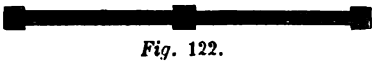


Fig. 122.

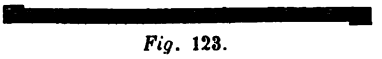


Fig. 123.

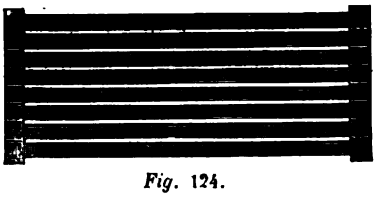


Fig. 124.

Fig. 125.

M. Princep a observé le premier que la fonte échauffée conserve après son refroidissement une partie de la dilatation qu'elle a éprouvée. Une cornue à gaz, après trois échauffements et refroidissements successifs, avait acquis un accroissement de longueur de 1 : 27 de sa longueur primitive. D'après M. Brix, un barreau de grille après dix-sept jours d'échauffement avait conservé un allongement permanent de 2 p. 100. Un autre barreau de mêmes dimensions, après un usage plus prolongé, avait acquis un accroissement permanent de 3 p. 100. Ces allongements se rapprochent d'un maximum à mesure que les alternatives se multiplient. Dans les appareils à air chaud en fonte par les hauts fourneaux, le même fait se produit : MM. Thomas et Laurens ont observé dans ce cas des allongements de 3 à 5 p. 100, suivant la provenance des fontes que l'on avait employées.

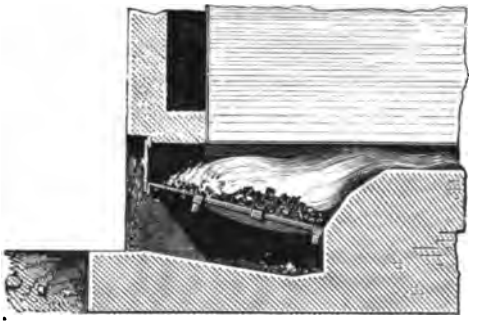


Fig. 126.

On trouve dans les ouvrages métallurgiques les nombres suivants, fournis par Rinmann, pour la dilatation totale du fer et de la fonte :

	Fer forgé.	Fonte.
De 25 à 525°.....	0,00714	0,0125
De 25 à 1300° (blanc naissant)...	0,0125	0,02144
De 500 à 1500° (blanc).....	0,0053	0,00893

Dans l'allongement et le raccourcissement successifs que subissent les barreaux par l'échauffement et le refroidissement, il peut se produire un effet dont il est bon de tenir compte ; quand les barreaux se contractent par le refroidissement, ils laissent un vide à leurs extrémités, et le mâchefer s'accumule dans ce vide, puis les barreaux se dilatant de nouveau repoussent la maçonnerie ; il en résulte qu'ils se courbent et font bomber l'avant du fourneau. On évite cet effet en coupant les extrémités des barreaux obliquement, de cette façon l'extrémité du barreau, lors de la dilatation, au lieu de comprimer le mâchefer, glisse sur lui en remontant légèrement, par suite de la coupe oblique du barreau.

756. Ordinairement les grilles sont horizontales, mais on les incline très-souvent vers le fond du foyer (*fig.* 128). Cette disposition est utile pour les combustibles qui produisent beaucoup de flamme. L'inclinaison est à peu près au dixième.

757. Lorsque les foyers sont profonds et qu'ils arrivent à des longueurs de grille de $1^m,30$, $1^m,50$, 2 mètres, etc., il convient de ne pas donner aux barreaux toute cette longueur ; et cela surtout quand leurs cendriers ne sont pas très-profonds. Des barreaux très-longs devraient être très-épais et très-forts pour pouvoir résister, et on doit chercher à faire les barreaux aussi minces que possible ; aussi les très-longues grilles sont divisées en deux ou trois grilles placées à la suite les unes des autres de manière à n'avoir pour chacune d'elles que des barreaux courts de même modèle ; nous entendons par *courts*, des barreaux de $0^m,50$, $0^m,60$ ou $0^m,70$ de longueur.

758. Pour avoir des barreaux minces en fonte, en leur donnant la résistance nécessaire, on a quelquefois fondu ensemble deux ou trois barreaux minces soudés par leurs talons des extrémités et du milieu ; ce modèle ne s'est pas répandu ; ces barreaux ne s'usent pas également vite, et pour en remplacer un, il y avait lieu de remplacer un groupe, ce qui rendait l'entretien plus coûteux.

759. Lorsque les charbons sont très-collants et qu'ils encrassent trop les grilles, on emploie la disposition indiquée par la figure 127 : la grille est formée de barreaux de fer carrés qui dépassent la face du fourneau ; on peut alors, sans ouvrir la porte, agiter successivement chacun d'eux, séparer ou faire tomber dans le cendrier les scories qui y sont attachées. Cette disposition est spécialement employée pour les foyers des fourneaux à réverbère, dans lesquels la température doit être plus élevée que dans ceux des chaudières à vapeur, ce qui ne permet pas d'ouvrir la porte du foyer pour nettoyer la grille.

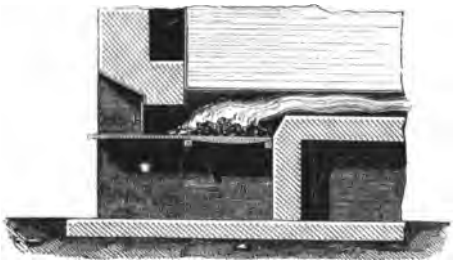


Fig. 127.

On a imaginé des grilles de dispositions et de formes très-diverses, dans le but d'obtenir une meilleure combustion ; nous en parlerons dans les chapitres suivants.

La grille doit être, dans tous les cas, placée à 75 ou 80 centimètres

au-dessus du sol, afin que le chargement et le nettoyage soient faciles. Les mêmes raisons font que la grille ne doit pas avoir plus de 2 mètres en longueur.

760. *Du foyer proprement dit.* — L'espace qui est au-dessus de la grille doit avoir une étendue suffisante pour contenir le combustible et pour permettre à la flamme de se développer. L'épaisseur du combustible sur la grille est très-difficile à déterminer, car on se trouve entre deux écueils qu'il faut également éviter : si l'épaisseur est trop petite, une grande partie de l'air qui passera à travers la grille échappera à la combustion, et en outre il faudra alimenter le foyer à de plus courts intervalles, circonstances qui, toutes deux, concourent à diminuer l'effet utile du combustible ; d'un autre côté, si l'épaisseur est trop grande, l'air la traversera difficilement, et il se dégagera beaucoup de fumée et beaucoup de gaz combustibles. On conçoit, d'après cela, qu'il est impossible de donner une règle précise sur la hauteur du combustible qu'on doit accumuler sur la grille, attendu que cette hauteur devra dépendre, non-seulement de la nature, mais encore de la grosseur des morceaux de combustible.

Quant à l'espace qui doit se trouver au-dessus du combustible, entre la grille et la chaudière, il n'est point arbitraire : si la chaudière était trop rapprochée, comme elle est à une température beaucoup moins élevée que la flamme, elle l'éteindrait, et par suite on obtiendrait de la fumée et une mauvaise combustion ; si, au contraire, elle était trop éloignée, elle ne recevrait qu'une partie du rayonnement, et il y aurait encore une perte d'effet utile, parce que l'air chaud sortirait à une température trop élevée.

761. On a reconnu par expérience que, pour les foyers à houille, il faut mettre, entre la grille et la chaudière ou le fond des bouilleurs, une distance de 30 à 35 centimètres, et de 40 pour les très-grands foyers. Cette distance doit être de 70 à 75 centimètres dans les foyers à bois, de 50 à 55 dans les foyers à tourbe, et de 60 environ dans ceux où l'on brûle du coke.

762. Mais si la chaudière devait être portée à une température très-élevée, peu différente de celle que prend l'air chaud à sa sortie du foyer, il faudrait, au contraire, placer la chaudière au milieu de la flamme, et négliger presque la circulation de l'air chaud, qui pourrait même dans certains cas la refroidir ; à cause de la haute température de la chaudière, la combustion ne serait point ralentie. Il y aurait alors une grande perte de chaleur ; mais elle serait inévitable, parce

que, comme nous l'avons déjà dit, l'air ne peut s'échapper à une température inférieure à celle du corps chauffé, et par conséquent la perte de chaleur serait d'autant plus grande, que la température de la chaudière serait plus élevée.

763. J'ai eu plusieurs fois l'occasion de reconnaître qu'en effet on économise beaucoup de combustible, en rapprochant le corps à chauffer de la grille quand il doit arriver au rouge, et qu'au contraire il y a économie à le mettre plus éloigné, quand il ne doit atteindre qu'une température peu élevée au-dessus de 100°, du moins lorsque le combustible produit de la flamme.

764. On conçoit aisément, qu'en augmentant la distance de la chaudière au foyer, on diminue la quantité de chaleur qu'elle reçoit par rayonnement, et que cette quantité doit varier à peu près en raison inverse du carré de la distance ; mais il semble que cette diminution doive être atténuée par l'accroissement des surfaces latérales, qui rayonnent sur la chaudière, et par une plus grande élévation dans la température des gaz qui sortent du foyer ; car, en supposant qu'il n'y ait point de chaleur perdue par la surface du fourneau, toute la chaleur qui n'est pas absorbée par le rayonnement sur la chaudière doit se retrouver dans l'air chaud. C'est certainement ce qui arrive, et si les surfaces de chauffe étaient assez étendues pour que le refroidissement des gaz fût complet, il est certain que l'effet utile produit serait indépendant de la distance de la chaudière au foyer, pourvu que cet espace fût suffisant pour la combustion des gaz ; mais, comme la surface de chauffe est limitée, il n'est pas douteux que l'air qui pénètre dans la cheminée ne soit à une température d'autant plus élevée, que cet air était plus chaud à l'entrée des carneaux.

765. Les foyers à bois devant avoir beaucoup de hauteur, à cause de la grande épaisseur du combustible et de l'espace nécessaire à la combustion, on les dispose souvent d'une manière particulière. La figure 130 représente une de ces dispositions ; la grille est horizontale et peu élevée au-dessus du sol ; l'air s'introduit à travers un grillage placé au niveau du sol, en avant du fourneau, et le foyer est muni de deux portes, l'une supérieure pour alimenter le foyer, l'autre inférieure qui sert à le vider. On emploie aussi très-souvent la disposition indiquée figure 126. On peut prendre 40 centimètres pour la distance de l'origine de la grille à la chaudière, et 80 pour celle de son autre extrémité. Des dispositions analogues peuvent être employées pour les foyers à tourbe et à coke.

On emploie souvent avec avantage pour la combustion du bois

des foyers à trémie ou à flamme renversée, que nous décrirons plus loin.

766. Les foyers sont habituellement encaissés latéralement par une partie verticale de briquetage, qui a une hauteur de 10 à 13 centimètres, et qui est rapportée avec les parois du carneau qui

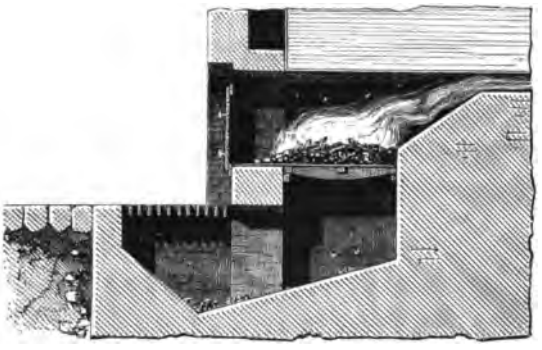


Fig. 128.

enveloppe les bouilleurs ou le corps de chaudière; au fond, à l'extrémité de la grille, on établit transversalement un mur vertical, ou *autel*, que l'on fait quelquefois bien plus haut que l'entourage latéral, afin de forcer la flamme et l'air brûlé à passer vivement contre la chaudière dans un espace rétréci à cet effet. Quand cet autel s'élève trop haut, il a d'abord l'inconvénient de diminuer l'étendue de la surface de chauffe qui peut recevoir le rayonnement de la grille, et, de plus, celui de produire de fréquentes dégradations dans la partie de la chaudière qui se trouve au-dessus du feu. Ce dernier inconvénient s'était manifesté d'une manière très-marquée aux premières chaudières de la Manufacture des tabacs, à Paris; dès que l'on eut convenablement abaissé l'autel, les chaudières cessèrent d'éprouver les incessantes altérations dont on avait depuis longtemps, mais en vain, cherché la cause.

767. *Portes des foyers.* — Entre l'extrémité de la grille et la porte du foyer, on doit laisser un intervalle de 30 à 40 centimètres, suivant la grandeur du foyer; quand la distance est trop petite, les portes rougissent, ce qui occasionne une perte de chaleur, et elles se détruisent rapidement. Cet espace est ordinairement occupé par une plaque de fonte engagée dans la maçonnerie, ou soutenue par des barres de fer. L'embrasure de la porte doit nécessairement aboutir

aux deux extrémités de la grille, afin que le chauffeur puisse facilement et d'un seul coup d'œil en embrasser toute l'étendue.

768. Les portes doivent avoir seulement les dimensions nécessaires pour que le chargement de la grille se fasse avec facilité ; on leur donne ordinairement 25 à 35 centimètres de hauteur, et une largeur qui dépend de celle de la grille. On les construit habituellement en fonte, et elles sont montées sur des plaques de même métal maintenues, contre la face antérieure du fourneau, par des boulons scellés dans la maçonnerie.

769. Les portes sont à un ou à deux battants, suivant leur grandeur; dans ce dernier cas, elles ne sont jamais dormantes, elles se maintiennent ouvertes ou fermées par le frottement des gonds, et elles sont garnies d'un crochet au moyen duquel le chauffeur les fait mouvoir. Souvent la plaque de fonte, sur laquelle se trouvent les gonds de la porte, se prolonge à la partie supérieure pour soutenir directement la tête des bouilleurs, et à la partie inférieure pour recevoir la porte du cendrier. Cette disposition très-convenable est représentée figure 129. L'ouverture du cendrier se ferme au moyen d'une plaque de fonte bien ajustée qu'on maintient en place par deux loquets tournants. Cette disposition permet de fermer le cendrier dans les intervalles de marche, et par suite de maintenir le feu avec une très-faible dépense.

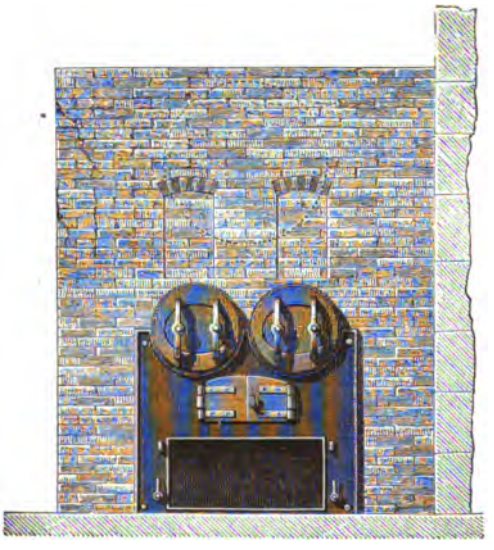


Fig. 129.

770. Quand les chaudières à vapeur sont à basse pression et sans bouilleurs, comme il y a en avant de la chaudière un canal à fumée, il y aurait quelquefois une trop grande distance de la porte à la grille, si on mettait la porte dans le plan de la face du fourneau ; pour la rapprocher, on soutient en avant une partie de la maçonnerie par une voûte ou par une plaque de fonte inclinée, ou enfin on place la porte

du foyer dans une embrasure en fonte. La première disposition est préférable aux autres ; c'est aussi celle qui est le plus généralement employée.

771. Dans quelques ateliers, j'ai vu employer de simples plaques de tôle de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, percées, au centre, d'une ouverture circulaire, et posées librement dans l'embrasure de la porte ; on les enlève et on les place à l'aide d'une tige de fer qu'on introduit dans l'ouverture. Ce mode de fermeture, qui est à la vérité peu dispendieux d'établissement et d'un service facile, est le plus mauvais que je connaisse. Les plaques ne ferment jamais bien, elles laissent pénétrer beaucoup d'air froid et par les bords et par l'orifice, qui reste toujours ouvert ; elles sont presque toujours incandescentes, et par conséquent laissent perdre une grande quantité de chaleur. Ainsi, l'économie apparente de leur construction et de leur service est bien compensée et au delà par les pertes de chaleur qu'elles occasionnent.

772. On fixe très-souvent derrière la porte, et parallèlement, à une distance de quelques centimètres, une plaque de tôle maintenue par quatre boulons. Cette disposition empêche la plaque extérieure de rougir, et en diminue beaucoup la température.

773. Quelquefois aussi les portes sont garnies intérieurement d'un cadre rempli de terre à briques. Cette disposition est très-bonne pour diminuer la perte de chaleur ; elle est surtout utile pour les grands foyers, parce qu'elle permet de réduire la distance de la grille à la porte.

774. Les foyers dont nous venons de parler, quand ils sont alimentés avec de la houille, ont presque toujours le grave inconvénient de produire de la fumée, surtout aux instants de chargement. Il en résulte une perte de combustible ; et, de plus, la fumée est très-incommode et souvent nuisible pour les habitations voisines. En outre, ils sont alimentés par un volume d'air beaucoup plus grand que celui qui est nécessaire à la combustion : de là une perte très-considérable d'effet utile.

775. On a fait un grand nombre d'essais pour éviter les inconvénients que nous venons de signaler. Dans ces derniers temps, les efforts ont été surtout dirigés vers la combustion de la fumée, ou plus exactement sur les moyens d'empêcher la fumée de se produire. Cette combustion a d'ailleurs été rendue obligatoire à Londres et à Paris, à cause de l'accroissement du nombre des générateurs dans ces deux villes. A Londres, un bill, connu sous le nom d'*Act*

Palmerston, enjoint à tous les propriétaires de fourneaux de la métropole de brûler la fumée de leurs foyers, sous peine des amendes stipulées dans le bill. A Paris, une ordonnance du préfet de police du 11 novembre 1854 enjoint pareillement aux propriétaires d'usines, dans lesquelles on fait usage de la vapeur, de brûler complétement la fumée de leurs fourneaux, ou d'alimenter les foyers avec des combustibles qui n'en produisent pas. Le délai assigné pour la mise à exécution était de six mois ; mais nous devons dire que jusqu'à présent ces ordonnances restent forcément inexécutées, parce qu'il n'existe pas d'appareil fumivore remplissant toutes les conditions exigées.

776. Les foyers constituent une des parties les plus importantes d'un appareil de chauffage. Nous décrirons successivement les différentes dispositions qui ont été essayées pour les améliorer, en commençant par les plus anciennes. Nous essayerons ensuite, en examinant ce qui se passe dans les foyers, d'en déduire les dispositions les plus avantageuses dans les différents cas qui peuvent se présenter.

CHAPITRE II

Différentes formes de foyers.

Foyers à flamme renversée.

777. Dans un grand nombre de fourneaux, la flamme est plus ou moins inclinée, et même renversée au delà du foyer ; mais cette circonstance, qui est indépendante de la direction de la flamme dans le foyer même, n'est pas celle dont il s'agit ici : nous voulons parler des foyers dans lesquels la flamme se développe à sa naissance dans une direction opposée à celle qu'elle prend naturellement.

778. La flamme s'élève verticalement par la légèreté spécifique que la chaleur donne aux gaz combustibles et à ceux qui sont produits par la combustion. Mais cette direction ne peut exister que dans un air calme, ou qui se meut dans le sens que la flamme tend à suivre naturellement. Quand le mouvement de l'air a une direction différente, les gaz combustibles prennent une direction qui résulte de leur vitesse propre et de la vitesse de l'air ; et lorsque la vitesse du courant d'air est très-grande relativement à celle des gaz qui se dégagent, la flamme suit sensiblement la direction de ce courant. Il

résulte de là que, si le courant d'air s'introduisait par la partie supérieure du foyer, la flamme se propagerait verticalement de haut en bas ; et, pour produire ce mouvement, il suffirait que l'espace qui se trouve au-dessous de la grille communiquât avec une cheminée préalablement échauffée.

779. Les foyers à flamme renversée ont l'avantage de brûler plus complétement la fumée que les autres foyers, parce que les gaz combustibles, qui tendent naturellement à s'élever à cause de leur densité moindre que celle de l'air, vont en quelque sorte à la rencontre du courant d'air ; par la même raison, les flammes sont beaucoup plus courtes. Mais ces foyers ne peuvent être employés pour la houille : les grilles se trouveraient en contact avec la surface incandescente du combustible, et seraient bientôt détruites. Cet inconvénient n'existe pas dans les foyers ordinaires, parce que les grilles sont continuellement refroidies par l'air qui vient alimenter la combustion ; et, d'ailleurs, la combustion n'est bien active qu'à une certaine distance au-dessus de la grille.

780. On avait proposé, pour les chaudières à vapeur, de brûler la houille à flamme renversée sur des grilles creuses constamment remplies d'eau, et communiquant avec la chaudière. Les barreaux auraient formé ainsi un grand nombre de petits bouilleurs qui n'auraient pu s'échauffer à une température suffisante pour que le métal fût altéré ; mais cette disposition est trop compliquée, elle exigerait de trop fréquentes réparations, et ne présenterait pas des avantages assez importants pour compenser ces inconvénients.

781. On a également proposé de se servir de barreaux en terre réfractaire. Cette disposition pourrait être convenable pour le bois et la tourbe ; mais, pour la houille et le coke, les résidus se vitrifieraient sur les barreaux et les mettraient promptement hors de service.

782. La figure 130 représente une coupe verticale d'un foyer à bois, à flamme renversée. L'espèce de trémie dans laquelle le bois est engagé doit être garnie de plaques de tôle ou de fonte. Le bois descend par son propre poids, auquel peut s'ajouter une pression exercée par le chauffeur ; il doit être coupé d'une longueur égale à la largeur de la trémie dont la section est celle d'une grille destinée à brûler la même quantité de bois dans le même temps. Ces foyers marchent très-bien, sans donner de fumée et sans produire d'accumulation de cendres dans le foyer proprement dit ; toutes celles qui se produisent sont entraînées dans les carneaux ; la combustion est si complète que les carneaux sont à peine noircis. J'ai eu l'occasion

de voir plusieurs chaudières à vapeur dont les foyers étaient ainsi disposés et qui donnaient des résultats très-satisfaisants.

Quoique les foyers pour bois, à flamme renversée, ne produisent point de suie (du moins tous ceux que j'ai eu l'occasion d'observer sont dans ce cas), il est prudent cependant de se ménager les moyens de nettoyer au besoin les carneaux ; et, pour cela, on doit creuser, dans le sol et au delà des chaudières, un espace dans lequel s'ouvrent les portes des carneaux et par où l'on puisse les nettoyer, au moyen d'un ringard dont le manche s'allonge par des pièces qui se montent à vis.

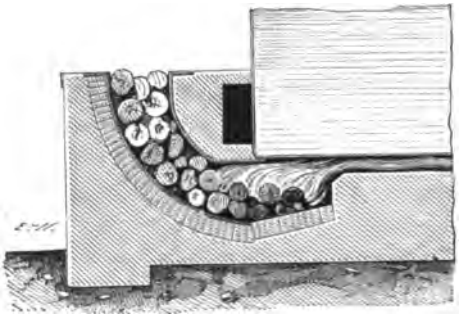


Fig. 130.

783. Cette même méthode pourrait être employée pour brûler la tourbe ; mais comme ce combustible produit beaucoup de cendres,

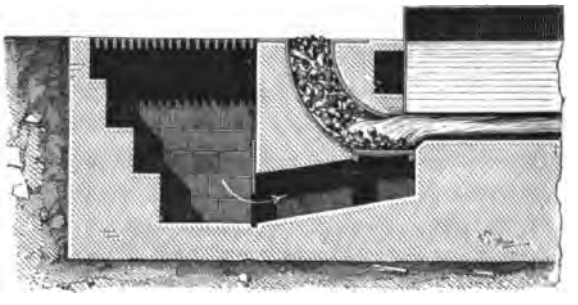


Fig. 131.

il faudrait disposer l'appareil comme il est indiqué dans la figure 131. En avant de la trémie se trouve un espace recouvert d'un grillage et dans lequel le chauffeur peut descendre pour dégorger la grille au moyen d'un ringard. Il serait possible qu'il fût avantageux de laisser passer continuellement un faible courant d'air à travers la grille. Je dois dire cependant que les foyers à flamme renversée appliqués à la tourbe n'ont point encore été essayés, et qu'alors on ne peut rien affirmer de positif sur leur efficacité, quoiqu'il soit bien probable qu'ils réussiraient comme pour le bois. Ce genre de foyer à trémie

débouchant sur une grille est applicable aux houilles non collantes et au coke.

784. Dans les foyers à poteries communes, on brûle la houille dans des caisses latérales en maçonnerie, fermées de tous côtés, excepté en dessus, où elles sont garnies d'une porte destinée à introduire le combustible et l'air nécessaire à la combustion ; la face adossée au fourneau est percée de plusieurs orifices, par lesquels la flamme pénètre dans le fourneau. Ces foyers produisent peu de fumée ; ils seraient cependant remplacés avec avantage par celui qui est indiqué dans la figure 134. La combustion est alimentée et par l'air qui passe à travers la grille A, dont la quantité est réglée par le registre B, et par celui qui pénètre à travers l'orifice C, qui sert à introduire le combustible, et dont on peut aussi régler à volonté l'ouverture.

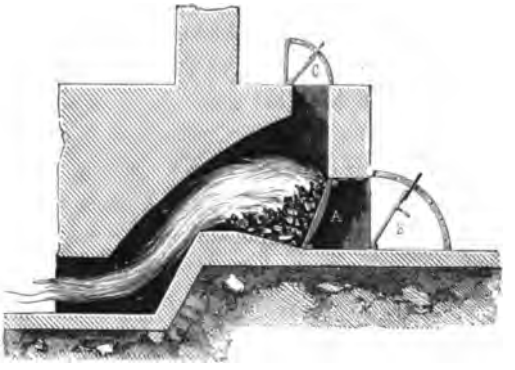


Fig. 132.

785. On a encore imaginé de renverser la flamme au delà du foyer (*fig.* 133), en la faisant passer sous une voûte. Deux petites ouvertures, dont la section se réglait par des registres, permettaient d'introduire de l'air dans les gaz enflammés, pendant le renversement du courant, afin de compléter la combustion. Dans des expériences faites, il y a quelques années, par MM. Thomas et Laurens, sur un foyer disposé ainsi, avec un peu de soin, on évitait complétement la fumée et on obtenait une économie de combustible d'un dixième environ ; mais la voûte était assez rapidement détruite par la haute température.

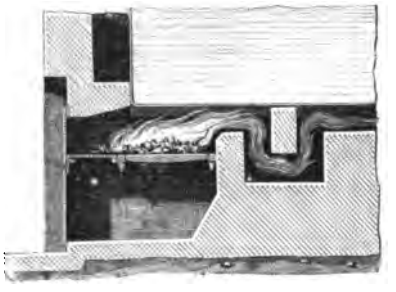


Fig. 133.

Foyers à réverbère.

786. Dans cette disposition, le foyer est surmonté d'une voûte en briques réfractaires, et l'air chaud s'échappe tantôt par des orifices diversement placés dans la voûte, tantôt à la suite quand elle est cylindrique. Le foyer se trouve ainsi à une très-haute température, et si le combustible est facilement décomposable, comme le bois, la tourbe et les houilles grasses, il se dégage beaucoup plus de fumée que dans les foyers ordinaires : ainsi, ces prétendus foyers fumivores produisent un effet opposé à celui qu'ils promettent. En outre, ils ont le grand inconvénient de diminuer ou de rendre presque nul l'échauffement de la chaudière par rayonnement, et par conséquent d'exiger des surfaces de chauffe beaucoup plus étendues. Cette disposition pourrait cependant être très-utile pour certains anthracites qui ne brûlent bien qu'à une haute température.

Foyers à injection d'air sur la flamme.

787. Les foyers fumivores à courants d'air froid paraissent avoir été employés pour la première fois par Watt. Mais ce fut Robertson qui prit le premier, en 1801, une patente en Angleterre, pour la construction de ces foyers. Son appareil consistait en une grille un peu inclinée vers le fond ; l'air extérieur arrivait à travers la grille comme dans les appareils ordinaires, mais le foyer était alimenté de combustible par une trémie placée au-dessus de la porte, et au-dessus de la trémie se trouvait une fente étroite par laquelle entrait un courant d'air qui arrivait directement sur la flamme.

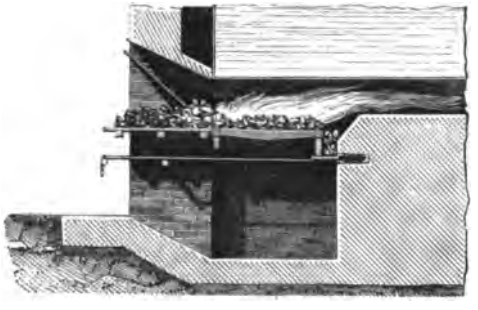


Fig. 134.

La figure 136 représente un appareil analogue à celui de Robertson, mais beaucoup plus simple ; on étale le combustible sur la grille avec un ringard ; on fait tomber le résidu au moyen d'une coulisse qui se trouve au delà de la grille, et on peut surveiller la combustion par la fente qui laisse arriver l'air sur la flamme.

Les appareils dans lesquels le foyer est alimenté par une trémie supérieure ou placée au niveau de la grille, ont l'avantage de ne pas produire autant de fumée que les appareils ordinaires, parce que l'introduction du combustible s'opère d'une manière à peu près continue ; mais il est difficile de gouverner le feu et de maintenir constamment le combustible à une hauteur convenable.

788. *Appareil de M. Darcet.* — Dans la disposition imaginée par M. Darcet, une fente étroite, horizontale (*fig.* 135), pratiquée dans l'autel, laissait arriver un courant d'air extérieur, que le chauffeur pouvait régler à volonté et qui venait à la rencontre de la flamme. Cette disposition, établie en 1814 aux bains du Pont-Royal, a donné de bons résultats.

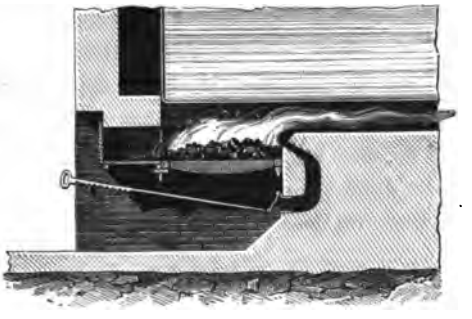


Fig. 135.

789. *Appareil de M. Parkes.* — En 1820, M. Parkes a pris, en Angleterre, un brevet pour une disposition semblable à celle de M. Darcet. M. Parkes s'est servi comparativement de l'air froid et de l'air chaud, et il n'a trouvé aucune différence dans les résultats. Il a aussi employé l'appareil d'alimentation de Robertson (789) pour éviter la production de la fumée au moment du chargement. D'après une enquête du parlement, l'appareil de M. Parkes doit être rangé parmi ceux qui donnent les résultats les plus satisfaisants ; dans beaucoup de cas, il produit la combustion, sinon complète, du moins à peu près complète de la fumée.

790. *Appareil de M. Chapman de Whitby.* — Dans cet appareil, l'air s'échauffe en passant à travers les barreaux creux qui forment la grille. Il se rend dans une chambre située derrière l'autel, d'où il est versé sur la flamme par une fente horizontale, comme dans la disposition imaginée par M. Darcet. Afin d'éviter le mauvais effet résultant de l'ouverture de la porte du foyer pour introduire le combustible, M. Chapman effectuait le chargement par une trémie placée au-dessus du foyer, ou par la méthode indiquée (787). Cet appareil donnait d'assez bons résultats.

791. On a aussi imaginé d'introduire dans la flamme, au delà du foyer, de l'air chauffé dans des tuyaux de fonte placés dans les car-

neaux. La disposition la plus simple consistait en un certain nombre de cônes en fonte communiquant avec l'air extérieur, disposés en quinconce à la suite du foyer, et dont la surface était percée d'un grand nombre de petits orifices par lesquels l'air échauffé se répandait dans toutes les directions.

792. *Appareil de M. Lefroy.* — Cet appareil se compose d'un petit corps de maçonnerie placé en avant du fourneau et renfermant le foyer ; une trémie placée au-dessus permet de jeter sur la grille un volume déterminé de combustible, sans établir de communication entre l'intérieur et l'extérieur. Quatre ouvertures longues, étroites, sont percées dans les faces latérales du foyer, dans la voûte et dans la maçonnerie qui se trouve au delà de la grille ; elles sont ordinairement fermées, mais elles s'ouvrent simultanément par un mécanisme très-simple après chaque chargement. Les remous et les tourbillonnements qu'éprouve la fumée par ces courants d'air qui arrivent de différents côtés, et dans un espace à une très-haute température, produisent une combustion complète de la fumée. L'appareil, au moyen duquel on charge le foyer, se compose d'un cylindre vertical en tôle, fermé par un couvercle, et fixé par la partie inférieure sur une feuille de tôle d'une longueur qui excède le double du diamètre du cylindre ; cette feuille de tôle est percée au-dessous du cylindre d'une ouverture d'un même diamètre, et elle glisse à volonté sur une autre feuille de tôle fixée à la partie supérieure du foyer. On voit facilement que, par cette disposition, quand le cylindre qui renferme la charge de combustible est amené au-dessus du foyer, le combustible tombe, et, quand on le ramène à côté, l'orifice supérieur du foyer se trouve fermé ; ainsi le chargement a lieu sans établir de communication avec l'extérieur.

Ces appareils ont eu à l'origine beaucoup de vogue ; on en a construit dans un grand nombre d'ateliers ; mais on y a complétement renoncé, d'abord parce que l'effet utile du combustible était diminué par suite de la trop grande quantité d'air introduite dans le foyer à chaque charge ; ensuite parce que les chaudières étaient facilement brûlées dans le voisinage du foyer, et surtout parce qu'on était privé de la surface directe de chauffe.

793. *Expériences de M. Combes sur l'influence des injections d'air.* — On doit à M. Combes des expériences très-intéressantes sur les effets produits par des injections d'air à la suite du foyer; je rapporterai un extrait du Mémoire qui a paru dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, tome XLIV.

Les expériences ont été faites sur le foyer d'un générateur à deux bouilleurs de la forme ordinaire ; la surface de la grille était de $0^{mq},65$, la somme des espaces vides était le quart de la surface totale ; la hauteur de la cheminée était de 20 mètres, la section au sommet de $0^{mq},20$; la surface de chauffe du générateur de 15 mètres carrés ; on brûlait par heure, sur la grille, environ 80 kilog. de houille menue très-fumeuse, à peu près $1^{k},23$ par décimètre carré ; les scories étaient noires et pâteuses, de sorte qu'on était obligé de décrasser souvent et péniblement les barreaux. De chaque côté de la grille, on avait pratiqué un canal s'ouvrant à l'extérieur et débouchant en arrière de l'autel, à $0^{m},15$ de distance ; ces deux ouvertures étaient pratiquées dans les faces latérales de la maçonnerie, et produisaient des jets opposés ; chacune avait $0^{m},20$ de hauteur verticale et $0^{m},065$ de largeur ; leur surface réunie était de $0^{mq},0234$, à peu près 0,16 de la surface libre de la grille et 0,12 de celle de la cheminée au sommet. Les orifices d'admission de l'air pouvaient être fermés à volonté. Un autre orifice avait été pratiqué dans le canal de circulation de la fumée autour de la chaudière pour en extraire des gaz et les analyser. L'ouverture du cendrier était fermée par une porte à deux ventaux, percés chacun de trois orifices rectangulaires égaux, ayant ensemble une surface de $0^{mq},168$, et par conséquent plus grands que la surface libre des barreaux de la grille. Les charges successives étaient à peu près de 20 kilog., et les intervalles de chargement de 12 à 14 minutes ; on tisait une fois dans cet intervalle. Derrière l'autel, se trouvait une plaque de fonte horizontale percée d'un grand nombre de trous, par lesquels on pouvait faire arriver de l'air extérieur ; mais on ne s'est pas servi de ce mode d'admission de l'air, parce qu'on a reconnu que le premier était au moins aussi efficace.

Lorsque les ouvreaux pour l'admission de l'air extérieur étaient fermés, une fumée noire se manifestait après chaque chargement et durait de 3 à 4 minutes ; à cette fumée succédait une fumée jaunâtre, à peu près de même durée, qui s'éclaircissait ensuite graduellement, de manière à disparaître complétement à la fin de l'intervalle qui séparait deux chargements consécutifs ; le tisage donnait toujours lieu à une fumée noire d'une minute au plus de durée. D'après ces observations, il y a, dans une heure, 18 minutes de fumée noire, 14 minutes de fumée jaune et 28 minutes pendant lesquelles la fumée est sensiblement nulle.

En réduisant la consommation de houille à 40 kilog. par heure,

l'intervalle des chargements est de 22 à 25 minutes, il y a peu de fumée noire, moins de fumée jaune, et plus de temps pendant lequel la fumée est imperceptible ; en moyenne, par heure, 2 minutes de fumée noire, 10 minutes de fumée légère, et 47 minutes sans fumée.

Si l'on observe, au moyen d'un regard ménagé à l'arrière du fourneau, on reconnaît que le conduit, aussitôt après le chargement, se remplit d'une fumée opaque, qui n'est sillonnée par aucun trait de flamme, de sorte que, immédiatement après que le chauffeur a fermé les portes du fourneau, il est impossible d'apercevoir le feu qui est à l'extrémité de ce conduit ; si, au moment où la fumée est ainsi le plus épaisse, on débouche les deux ouvreaux qui laissent arriver l'air en arrière de l'autel, la fumée prend feu immédiatement et brûle avec une flamme allongée qui arrive jusqu'à l'extrémité des bouilleurs : ferme-t-on les ouvreaux, la flamme s'éteint sur-le-champ. Cette manœuvre peut être répétée aussi souvent qu'on le veut, tant qu'on est dans la période où le fourneau produit une fumée passablement épaisse. La personne, dont l'œil est appliqué au regard, distingue ainsi parfaitement, par ce qui se passe dans le conduit, les instants où les ouvreaux sont ouverts et fermés. Si l'on observe le sommet de la cheminée, on en voit sortir des flots de fumée noire, quelques instants après l'ouverture des conduits d'air, après quoi la fumée s'éclaircit et reste ensuite légère et transparente. La première irruption de la fumée est produite par la première introduction de l'air qui chasse devant lui la fumée opaque dont les carneaux et la cheminée étaient remplis.

Si on laisse les ouvreaux constamment ouverts, la combustion étant poussée activement, on n'a plus de fumée noire, même après le chargement. La durée de la fumée légère diminue aussi. En définitive, sur une heure, on a, en moyenne, trois quarts de minute de fumée noire, 21 minutes de fumée légère, 38 minutes un quart sans fumée sensible.

Les ouvreaux étant à demi bouchés, on a, en moyenne, une combustion moins vive ; dans une heure, une minute de fumée noire, 23 minutes de fumée légère, et 36 minutes sans fumée. Les teintes noires et légères de la fumée produite quand les ouvreaux sont ouverts, sont moins foncées que lorsque les ouvreaux sont fermés.

Quand la combustion est lente, la fumée reste à peu près la même, soit qu'on tienne les ouvreaux entièrement ouverts, soit qu'on les ouvre à moitié.

En résumé, la fumée qui se produit par une combustion lente,

les ouvreaux étant ouverts, n'est guère plus forte que celle d'un foyer domestique et ne paraît pas de nature à incommoder le voisinage ; celle qui se manifeste par une combustion vive dans le même fourneau, lorsque les ouvreaux sont fermés, est épaisse, opaque, chargée de noir de fumée, de manière à la rendre fort incommode pendant près d'un tiers du temps. Il est donc possible, sinon de faire disparaître complétement, au moins de diminuer de beaucoup la fumée, en laissant arriver de l'air au delà du foyer, à quelques centimètres derrière l'autel, lorsque le fourneau est pourvu d'une cheminée produisant un bon tirage.

Des essais nombreux sur les gaz écoulés ont donné les résultats suivants. Les ouvreaux étant fermés, les gaz après la charge, lorsqu'ils emportent une fumée noire, contiennent en volume, de 0,10 à 0,13 d'acide carbonique, et de 0,08 à 0,065, d'oxygène libre ; le surplus est formé d'azote et de gaz combustibles. Lorsque la fumée est légère, les ouvreaux d'admission de l'air étant fermés, les gaz renferment de 0,07 à 0,09 d'acide carbonique, et 0,10 d'oxygène libre. Enfin lorsque la fumée est complétement nulle, les gaz contiennent 0,06 d'acide carbonique et 0,13 d'oxygène libre.

Lorsque les conduits d'admission de l'air sont entièrement ouverts, les gaz, après le chargement, renferment de 0,06 à 0,08 d'acide carbonique et de 0,09 à 0,10 d'oxygène libre. A mesure que la combustion avance, la quantité d'acide carbonique diminue et celle de l'oxygène libre augmente ; à la fin de l'intervalle qui sépare deux chargements consécutifs, la cheminée ne produisant plus de fumée apparente, les gaz renferment 0,05 d'acide carbonique et 0,14 d'oxygène libre ; et les gaz combustibles ne dépassent pas 0,025.

En définitive, la fumée reste épaisse, tant qu'il existe dans le courant gazeux plus d'acide carbonique que d'oxygène libre en volume ; elle commence à s'éclaircir, lorsque les volumes sont égaux ; et elle est nulle, lorsque le volume de l'oxygène est égal à deux fois celui de l'acide carbonique.

794. On a mesuré avec l'anémomètre les volumes d'air qui pénétraient dans le fourneau à travers la grille et les canaux d'admission. Il résulte de ces expériences, que la quantité d'air qui s'introduit par le cendrier est très-faible après chaque chargement ; que cette quantité augmente à mesure que la houille se transforme en coke ; et qu'à la fin de l'intervalle qui sépare deux chargements, elle est à peu près quatre fois plus grande qu'au commencement. Le tisage, qui donne lieu à une bouffée de fumée noire, a aussi pour effet de

diminuer la quantité d'air qui traverse la grille. Celle qui s'introduit par les ouvreaux demeure à peu près constante : immédiatement après le chargement, elle est plus du double de celle qui traverse la grille ; à la fin de l'intervalle qui sépare deux chargements, elle n'en est guère que la moitié. L'introduction de l'air par les conduits paraît déterminer un accroissement de vitesse dans le courant d'air qui pénètre à travers la grille, dans les instants qui suivent le chargement de combustible : c'est, sans doute, l'effet d'un accroissement de tirage, produit par l'élévation de température qu'occasionne la combustion des produits de la distillation de la houille. Pour une combustion de 80 kilogr. de houille à l'heure, le volume d'air entrant par les conduits complétement ouverts était de $14^{mc},33$ par minute ; cet air devait jaillir dans le courant de fumée avec une vitesse de 8 mètres par seconde. Le volume d'air entrant par le cendrier et traversant la grille était de $5^{mc},34$, immédiatement après un chargement, et s'élevait à 19 mètres cubes à la fin de l'intervalle qui sépare deux chargements. En supposant que la variation ait été uniforme, on trouve que le volume d'air appelé par kilogramme de houille brûlé a été de $19^{mc},87$.

La quantité d'eau vaporisée par kilogr. de houille a varié de $4^{k},87$ à $5^{k},37$. L'admission de l'air, par les conduits tenus constamment ouverts, n'a eu aucune influence sur l'économie du combustible, probablement parce que l'accroissement de chaleur, produit par la combustion complète des gaz, était compensé par l'abaissement de température provenant d'un excès d'air, quand le combustible était presque entièrement transformé en coke. Il y aurait alors de l'avantage à ne laisser entrer l'air dans le fourneau, que pendant les premiers instants qui suivent chaque chargement.

Ces expériences sont restées jusqu'à présent sans aucun résultat pratique. Du reste, la quantité de vapeur, produite par kilogr. de houille dans cette chaudière, est inférieure, comme on le verra plus loin, à la production moyenne des chaudières employées dans l'industrie. Il est regrettable que, dans son mémoire, M. Combes ne mentionne pas la quantité de carbone, qui est tenue en suspension par les gaz, et qui rend la fumée visible et incommode.

795. *Appareil de M. Wye Williams.* — Cet appareil consiste en une caisse placée derrière l'autel d'un foyer ordinaire ; l'air extérieur y pénètre et s'écoule ensuite, à la rencontre du courant des gaz chauds, par un grand nombre d'orifices. L'auteur préfère une injection d'air froid à une injection d'air chaud, parce que, sous le même

volume, l'air froid contient plus d'oxygène. Il paraîtrait que cet appareil est assez répandu en Angleterre où il serait regardé comme très-efficace.

796. *Appareil de M. Prideaux.* — Cet appareil ne diffère d'un foyer ordinaire que par la disposition toute particulière de la porte du foyer, qui est formée d'un cadre renfermant trois séries de jalousies en fer. Ces jalousies s'ouvrent et se ferment ensemble manœuvrées par un piston qui, sollicité par son propre poids, se meut dans un cylindre plein d'eau d'un diamètre un peu plus grand ; la vitesse est réglée par le mouvement de l'eau qui se trouve en dessous et qui passe en dessus. Par cette disposition, on introduit dans le foyer un volume d'air additionnel, décroissant dans l'intervalle de deux charges consécutives. D'après des expériences faites dans l'arsenal de Portsmouth, l'appareil de M. Prideaux, appliqué à des chaudières de bateaux, a donné de bons résultats sous le rapport de la combustion de la fumée ; mais il n'a pas été adopté par l'industrie à cause de la complication d'articulation et de mécanisme qu'il comporte, ce qui le rend sujet à se déranger.

On trouve assez souvent, en Angleterre, une disposition analogue mais bien plus simple, qui consiste à ménager dans les portes des foyers, des orifices fermés par des cocardes, dans le genre de celles des bouches de chaleur des calorifères. Le chauffeur ouvre plus ou moins ces cocardes et règle ainsi les admissions d'air au-dessus de la grille suivant les besoins. Il va sans dire que cette manœuvre exige une certaine habileté et du soin de la part du chauffeur.

797. Tous les appareils dans lesquels l'injection de l'air sur la flamme se fait également pendant toute la durée de la combustion ont l'inconvénient de déterminer l'introduction d'une quantité considérable d'air en excès, et par suite diminuent la température des produits de la combustion ; il en résulte une diminution notable de l'effet utile en raison de la quantité plus grande de chaleur emportée dans la cheminée.

Pour les appareils où l'introduction de l'air se règle automatiquement, nous avons vu que les dérangements qui résultent de la complication du système ont forcé à renoncer à leur emploi.

Les appareils où l'introduction de l'air se règle à la main sont théoriquement satisfaisants ; mais leur bon fonctionnement dépend exclusivement du soin que le chauffeur prend à les manœuvrer, et, dans bien des cas, il est à craindre que les avantages qu'on en attend ne se trouvent pas réalisés.

798. M. Palazot fait arriver de l'air dans le foyer par une fente pratiquée dans l'autel, un peu en arrière de la grille, ou par une petite grille placée dans toute la longueur et en avant du foyer; ces ouvertures peuvent être démasquées à volonté par le chauffeur. Une voûte en terre réfractaire est placée au-dessus de l'autel; par le rétrécissement du courant gazeux, elle en facilite le mélange, et sa température élevée favorise ou détermine la combustion. La disposition dans laquelle l'air arrive près de l'autel paraît donner des résultats moins bons que lorsque l'air est introduit à l'avant de la grille. M. A. Burnat, dans un rapport à la Société de Mulhouse (1863), examine l'appareil Palazot, qu'il a expérimenté, il le trouve simple, peu coûteux, et d'une fumivorité satisfaisante; sous les chaudières sans réchauffeur, il a déterminé une perte de 4,6 à 6,5 p. 100; avec les chaudières à réchauffeur, il y aurait une faible économie; M. Burnat ne croit pas qu'en aucun cas on doive chercher dans l'adoption du foyer Palazot un motif d'économie.

Nous devons ajouter que ces résultats supposent l'appareil en parfait état d'entretien et placé entre les mains d'un chauffeur soigneux et attentif. Rappelons aussi que feu Thomas, ingénieur, avait essayé bien antérieurement à M. Palazot de placer une voûte sous les bouilleurs pour renverser la flamme et provoquer la combustion du gaz; mais l'altération rapide de cette voûte et la difficulté de la réparer ont fait renoncer à son emploi qui était, d'ailleurs, favorable à la fumivorité.

Foyers doubles combinés.

799. Dans les appareils de ce genre, on fait passer la flamme qui sort d'un foyer ordinaire à houille sur ou à travers un autre foyer, dans lequel brûle du coke. De cette manière, les gaz combustibles qui sortent du premier foyer se trouvent, à leur passage sur le second, à une température suffisante pour brûler, et il suffit, pour que la combustion ait lieu, d'admettre l'air extérieur en quantité suffisante.

L'appareil imaginé par Watt se compose de deux foyers distincts, l'un alimenté par la houille, l'autre par du coke. Cette disposition est assez efficace quand les portes sont fermées, mais elle l'est très-peu quand elles sont ouvertes, parce qu'il n'y a qu'une petite quantité de gaz qui traverse le coke; d'ailleurs, elle exige deux combustibles.

On pourrait facilement disposer les appareils de manière à alimenter les deux foyers avec de la houille, et à obtenir cependant le même effet que si l'un d'eux était constamment alimenté avec du coke ; il suffit, pour cela, de charger alternativement les deux foyers, et de faire passer la fumée du foyer qu'on charge sur l'autre ; car, pendant la seconde moitié de la combustion de la houille, ce combustible est à peu près à l'état de coke. L'appareil pourrait être disposé comme l'indique la figure 136 ; on forcerait la fumée du foyer qu'on vient de charger à passer sur l'autre, au moyen de deux registres en fonte épaisse qu'on élèverait et qu'on abaisserait successivement.

800. On pourrait aussi employer la disposition figure 137. La grille est circulaire et mobile, de manière à tourner successivement en sens contraire d'un demi-tour. On amènerait toujours du même

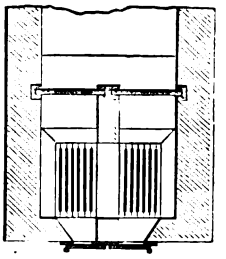


Fig. 136.

Fig. 137.

côté, le plus éloigné de l'ouverture du carneau, la partie de la grille qu'on chargerait de houille. Tous ces appareils sont compliqués ; ils font perdre une partie de la surface de chauffe, et ils n'ont pas été adoptés par l'industrie.

801. Quand les appareils de chauffage peuvent marcher par groupe, on peut réaliser d'une façon assez simple les conditions que nous venons d'indiquer : on peut, comme on l'a fait aux forges et chantiers de la Méditerranée, associer deux fours à puddler, mélanger les fumées sur un long parcours et les utiliser ensuite à la production de la vapeur ; en alternant les charges dans les deux fours, on obtient une combustion complète sous la chaudière (*Annales des mines*, 1866. Rapport de M. Freycinet).

802. Dans le foyer Delage (*Annales des mines*, 1866), on chauffe une chaudière à trois bouilleurs ; deux d'entre eux sont placés chacun sur une grille, et les gaz, après avoir circulé dans des carneaux annulaires, se rendent de chaque côté d'une chambre de combustion placée

au-dessus du troisième bouilleur; les gaz arrivent de chaque côté en sens inverse, leurs courants se brisent et ils se mélangent; si l'on a soin de charger alternativement les foyers, on obtient une combustion complète, qu'on facilite du reste au moyen d'une rentrée d'air qui se fait par une porte placée à l'avant de la chambre de combustion.

Toutes ces dispositions exigent un soin particulier dans la conduite du foyer; elles peuvent d'ailleurs être une gêne au point de vue de l'opération accomplie dans l'appareil chauffé; et peuvent, dans certains cas, entraîner un supplément de dépense, elles ne sont à recommander que quand on est absolument obligé de se débarrasser de la fumée.

803. *Appareil de M. Grar.* — L'appareil décrit (801) avait le grand inconvénient d'exiger des registres placés près du foyer et qui auraient été promptement mis hors de service, et de soustraire, en grande partie, la chaudière au rayonnement du foyer. M. Grar a évité ces inconvénients au moyen de la disposition suivante.

Les foyers, au nombre de 6, pour un générateur de 130 chevaux, sont placés dans le sens de la longueur d'un générateur; à chaque extrémité est un registre, qui permet de faire marcher les gaz à droite ou à gauche; au-dessus des foyers se trouve une chaudière; au-dessous, une seconde chaudière que les produits de la combustion parcourent dans toute sa longueur, avant de se rendre dans la cheminée. Les foyers doivent être alimentés dans un certain ordre en rapport avec la position des registres. Supposons tous les foyers allumés et les gaz marchant de gauche à droite : on alimentera successivement le foyer le plus à gauche, et successivement les deux suivants; alors on changera, par le mouvement des registres, le sens du mouvement des gaz, et on alimentera successivement le 6e, le 5e, le 4e foyer; et puis, après un nouveau changement dans le sens du mouvement des gaz, le 1er, le 2e et le 3e. Ces dispositions peuvent être employées avec tout autre nombre de foyers. Bien que les résultats obtenus soient, d'après l'auteur, très-satisfaisants, je ne sache pas que cette disposition se soit répandue; elle a l'inconvénient d'exiger des chauffeurs très-soigneux et de ne pas permettre l'établissement des chaudières accolées.

Foyers avec grilles à gradins, à étages, etc.

804. *Appareils de M. Hall, de M. Fairbairn et de M. Buzonnière.*

— D'après la description de ces appareils, qui se trouve dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. II, p. 139, les gaz provenant du foyer à houille passeraient sur ou à travers un foyer à coke, immédiatement avant de pénétrer dans la cheminée. C'est certainement un moyen de brûler la fumée, pourvu que les gaz renferment un excès d'air ; mais cette combustion coûterait bien cher.

805. *Appareil de MM. Chanter.* — Cet appareil (*fig.* 138) se compose de deux grilles, la première inclinée, afin de faciliter l'écoulement du coke à l'arrière, la seconde horizontale, un peu plus basse, pour permettre l'enlèvement des scories. Cette disposition, appliquée aux générateurs fixes, paraît brûler assez complétement la fumée quand le feu est bien dirigé. En y ajoutant le mode d'alimentation indiqué (799), l'efficacité serait bien plus certaine.

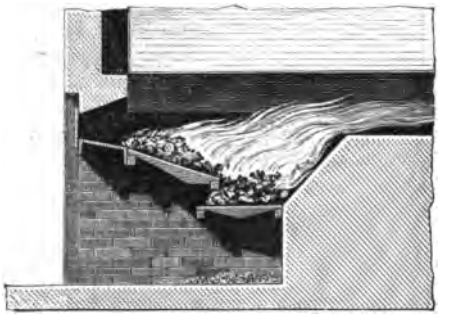


Fig. 138.

L'appareil appliqué aux locomotives se composait de deux grilles disposées comme nous venons de le dire : un bouilleur d'une forme particulière descendait très-près de l'extrémité de la première, et forçait les gaz qui s'en dégageaient à passer à travers le coke qui couvrait la seconde. D'après les inventeurs, on brûlait complétement la fumée, en employant $\frac{3}{4}$ de houille et $\frac{1}{4}$ de coke; mais, comme cette disposition, qui date d'un grand nombre d'années, n'est plus employée, il est à présumer qu'elle ne remplissait pas les conditions énoncées, ou qu'elle avait d'autres inconvénients qui l'ont fait abandonner.

806. *Appareil de M. de Marsilly.* — M. Commines de Marsilly et M. Chobrzynski ont appliqué à des générateurs fixes et à un certain nombre de locomotives une disposition particulière de grille. Cette disposition consiste en une série de barres plates de fonte placées en escalier et terminées par une grille formée de barreaux très-espacés. La figure 139 présente une coupe transversale d'une de ces grilles, appliquée à une chaudière à bouilleur. L'inspection seule de la figure suffit pour faire comprendre la disposition de l'appareil. Le chauffeur pousse successivement la houille d'échelon en échelon, et charge

directement le premier. L'air extérieur pénètre à travers le combustible par les intervalles des échelons et par ceux des barreaux. Cette disposition permet à un chauffeur attentif de faire marcher progressivement le combustible vers la grille à coke. Les grilles à gradins ont été employées sur un certain nombre de locomotives à mar-

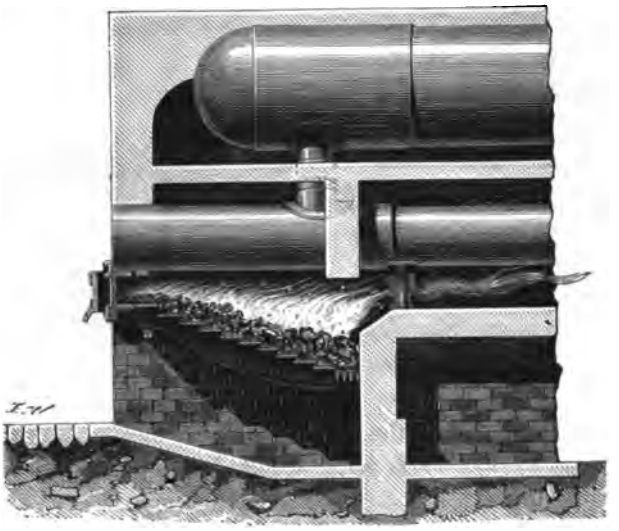


Fig. 139.

chandises du chemin de fer du Nord pour remplacer le coke par la houille, et les résultats sont satisfaisants.

Une notice sur les foyers fumivores par M. Viollet, revue par M. Combes, insérée dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. II, p. 133, renferme tous les détails de construction d'une grille à gradins appliquée à un générateur fixe, consommant à peu près 100 kilogrammes de houille par heure. La surface totale de la projection horizontale de la grille était de $1^{m},14$; la somme totale des espaces libres d'entrée de l'air était de $0^{m},26$: ainsi on brûlait à peu près 1 kilogramme par décimètre carré de grille, renfermant un quart d'espace libre. Dans cet appareil, M. de Marsilly avait produit une injection d'air chauffé au-dessous du premier carneau ; cet air débouchait à $0^{m},12$ au-dessous de l'autel par 6 orifices ayant ensemble une section de $0^{mq},01$.

Voici les résultats des expériences faites par M. de Marsilly :

« La grille est ordinairement recouverte de combustible sur une

épaisseur de $0^m,10$ à $0^m,15$. Au moment de charger, le chauffeur pousse en avant la houille qui se trouve sur la première plaque, la remplace par de nouveau combustible, et ouvre les carneaux par lesquels s'introduit l'air extérieur. En ce moment, il se dégage toujours un peu de fumée ; mais, après une ou deux minutes, elle a complétement disparu. Elle n'est jamais noire ni épaisse, comme celle que donnent, dans les foyers ordinaires, les houilles de Mons et de Denain. Deux ou trois minutes après le chargement, on ferme le conduit d'introduction de l'air, et la cheminée n'émet plus de fumée perceptible. On a brûlé ainsi des houilles flénu de Mons de la mine des Douze-Actions, houilles qui produisent ordinairement beaucoup de fumée. Sur la nouvelle grille, elles donnent une fumée assez abondante encore au moment du chargement et quand on agite le combustible avec un ringard ; cette fumée persiste pendant une ou deux minutes. M. de Marsilly croit que l'air n'arrivait pas en assez grande abondance, ou n'était pas assez chaud pour la brûler. On doit remarquer que la houille menue émet moins de fumée que la gailletterie, surtout quand on a eu soin de la mouiller un peu, et que l'on charge beaucoup à la fois. Avec les houilles maigres de Charleroi, et aussi avec les houilles flénu de Mons, mélangées d'un cinquième de houilles sèches de Fresnes ou de Charleroi, il n'y a aucune émission de fumée, même au moment du chargement. Les houilles maigres de Fresnes brûlent bien sur cette grille, et s'y maintiennent ardentes ; mais, comme elles ne donnent pas de flamme, la grille étant trop éloignée des bouilleurs, la pression dans la chaudière et la production de vapeur baissent rapidement. Les houilles flénu de Mons y brûlent avec une flamme beaucoup plus courte que sur les grilles ordinaires ; cette flamme ne s'allonge et ne dépasse l'autel que dans les instants qui suivent le chargement du foyer. Quelque temps après, et lorsque la fumée a disparu, l'extrémité de la flamme arrive seulement aux bouilleurs. Les mélanges de houilles de Mons avec celles de Fresnes ou de Charleroi donnent une flamme plus courte encore que les houilles de Mons employées seules ; pour des mélanges semblables, la grille est trop éloignée des bouilleurs. Le défaut de pureté des houilles ne nuit pas autant à la combustion que dans les foyers ordinaires. Le mâchefer s'accumule au bas de la grille ou sur les plaques de la partie en escalier sans y adhérer, parce que ces plaques s'échauffent peu. Ainsi, il ne met pas obstacle à l'arrivée de l'air par les intervalles entre les plaques échelonnées. En passant un ringard plat entre deux d'entre elles, on dégage facilement ces intervalles,

sans faire tomber les plus petites parcelles de combustible. »

D'après trois séries d'expériences ayant duré de quatre à dix heures, la grille étant alimentée par du flénu de Mons, la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de houille a varié de $5^k,84$ à $6^k,41$.

M. Leplay a publié en 1843 une disposition de ce genre, qu'il a donnée comme étant appliquée en Carinthie.

807. *Appareil de M. Langen* (*de Cologne*). C'est une grille inclinée comme la précédente, mais d'une disposition différente : on l'appelle grille à étages. En effet, la grille est divisée sur sa longueur en deux ou trois étages et le charbon, réduit en coke, arrive sur une petite grille horizontale qui se trouve au bas du plan incliné formé par les différents étages de la grille ; les barreaux de chaque étage ont l'inclinaison même de la grille, et pour trois étages, ils forment trois grilles indépendantes, placées les unes à la suite des autres, mais en laissant entre deux grilles successives un espace d'environ $0^m,20$; là les barreaux de la grille inférieure se recourbent horizontalement et se prolongent par une tablette en fonte qui forme foyer. Le charbon de la grille supérieure se répand et se mélange sur ce palier. Le premier palier, celui du haut, sert au chargement ; les paliers intermédiaires servent à soigner le feu, à faire marcher le combustible et, au besoin, à opérer un supplément de chargement. Cette disposition s'applique mieux aux grandes grilles qu'aux petites. Elle a été employée dans un certain nombre de fabriques des provinces Rhénanes ; la construction et l'entretien en sont plus coûteux que ceux de la grille ordinaire.

808. *Foyer Tembrinck.* — Il est à peu près exclusivement propre aux locomotives ; dans ce foyer, la grille est suffisamment inclinée pour que le combustible descende par son propre poids ; un bouilleur méplat est introduit dans la boîte à feu ordinaire, il est incliné et placé au-dessus de la grille. Le but de cette interposition d'une surface entre la grille et la plaque tubulaire est d'empêcher les gaz de la combustion de s'écouler immédiatement par les tubes, de les forcer à tourbillonner sur eux-mêmes de manière à obtenir une combustion plus complète ; on favorise cette combustion par une introduction d'air au-dessus de la grille ; ces différentes dispositions, ainsi que la hotte Friedmann, etc., avaient principalement pour but de brûler, sans fumée, de la houille dans les locomotives.

On sait de reste que cette fumivorité des foyers à houille des locomotives n'est pas parfaite.

809. *Appareil de M. Prunier.* — M. Prunier, ingénieur civil, a es-

sayé de brûler la fumée en plaçant à la suite du foyer un mur vertical de pierre ponce que les gaz sont obligés de traverser ; les morceaux de ponce, de 4 à 5 centimètres de diamètre, étaient maintenus entre deux murs de briques placées de champ, et éloignés de $0^m,40$. Dans les premiers instants, après l'allumage du foyer, il se dégageait un peu de fumée, et une très-grande quantité se déposait sur la ponce ; mais celle-ci devenait bientôt rouge ; la fumée cessait alors complétement, et celle qui y avait été déposée d'abord était brûlée ; la ponce s'use très-rapidement, et, par suite, les réparations sont fréquentes.

810. *Appareil de M. Fontenay.* — Sur l'autel, derrière la grille, est élevé un mur en briques, percé d'un grand nombre de trous circulaires d'environ $0^m,05$ de diamètre ; à $0^m,40$ ou $0^m,50$ en arrière de cette première cloison, s'en trouve une seconde percée également de trous, mais d'un plus petit diamètre ; les gaz sont ainsi mélangés et leur combustion est aussi favorisée par l'échauffement de ces cloisons. Ce système de cloisons placées immédiatement derrière la grille tend à élever la température dans le foyer, ce qui n'est pas un avantage. Il arrive même que les portes des foyers rougissent, ce qui cause une perte de chaleur et incommode le chauffeur ; il est en outre difficile de les maintenir en état et d'y faire les réparations nécessaires.

Foyers à alimentation continue.

811. La fumée provenant principalement du mode de chargement intermittent généralement employé, on a pensé de bonne heure que, si on parvenait à verser d'une manière continue le combustible sur la grille, on arriverait facilement à rendre les foyers fumivores. On a imaginé pour cela un grand nombre d'appareils ; je me contenterai de faire une courte description des plus importants.

812. *Appareil de Brunton.* — Cet appareil était composé d'une grille circulaire horizontale, mobile autour d'un axe vertical passant par son centre et faisant une révolution en 3 ou 4 minutes ; une trémie, placée au-dessus du fourneau, renfermait la houille divisée, qu'un mouvement de va-et-vient, imprimé à la plaque qui terminait la trémie, faisait tomber sur la grille à peu près à la moitié du rayon. Cet appareil brûlait assez complétement la fumée, mais il exigeait trop de surveillance et de trop fréquentes réparations.

813. *Appareil de Henley perfectionné par M. Collier.* — Dans

cette disposition, la grille est fixe et l'appareil est appliqué contre la face du fourneau. Il se compose principalement d'une trémie à débit continu, de deux cylindres broyeurs, horizontaux, à pointes de diamant, et de deux projecteurs circulaires, contigus, placés dans le même plan horizontal, qui tournent en sens inverse et concourent au même effet. La houille, à mesure qu'elle descend par la trémie, est réduite partie en petits éclats, partie en poussier par les broyeurs ; ainsi préparée, elle tombe sur les projecteurs, dans l'espace qui est compris entre leurs deux axes, et elle est continuellement lancée par eux sur la chauffe incandescente. La forme des projecteurs est celle d'une roue composée d'une coquille conique droite et de six palettes trapézoïdales, verticales, implantées autour de la coquille. Leur vitesse est de près de 200 tours à la minute, et l'on conçoit qu'un léger effet de ventilation doit se joindre à leur effet principal. Le débit du combustible est facile à régler à l'aide d'une vis de rappel. Tout le système est en fer, et se trouve établi sur une grande et forte plaque du même métal, verticale et percée convenablement du côté du fourneau. Cette plaque étant placée sur des roulettes, l'appareil peut alternativement servir deux chaudières.

D'après M. Cordier, à qui nous avons emprunté les détails qui précèdent (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1837), l'appareil dont nous venons de donner une description sommaire fonctionnait depuis six mois. Voici les avantages qu'il y trouvait :

1° Le chauffage est parfaitement régulier ; 2° toutes les parties du combustible, ou presque toutes, sont brûlées sous les bouilleurs ou sous la chaudière ; 3° la fumée qui se dégage au sommet de la cheminée n'excède pas la quantité qui est produite par beaucoup de foyers domestiques alimentés par le bois ; elle est d'ailleurs d'une teinte roussâtre très-claire, et elle n'offre aucun des inconvénients qui rendent si incommode le voisinage des grands ateliers chauffés à la houille ; 4° on consomme à peu près $\frac{1}{10}$ de combustible de moins que par les procédés ordinaires de chauffage ; 5° on emploie sans difficulté la houille menue ; 6° le tirage s'exécute facilement sans qu'on ouvre le fourneau : à cet effet, on se contente, à l'aide d'un ringard à crochet promené sous la grille, de piquer de temps à autre la couche de combustible en ignition, de manière à ce qu'elle ne conserve jamais plus de 3 centimètres d'épaisseur ; 7° le chauffeur, se trouvant chargé d'une surveillance extrêmement facile, peut don-

ner plus de soin à la machine ; il a besoin d'ailleurs d'une moindre habileté que les chauffeurs ordinaires. Enfin, l'appareil peut être appliqué à toute espèce de fourneaux ; il peut ensuite en être séparé sans perdre de sa valeur, et rentrer dans la circulation commerciale. Le travail dépensé par la machine a été évalué à $\frac{1}{2}$ cheval, c'est-à-dire à $\frac{1}{12}$ de la force totale.

Malgré tous les avantages énoncés par le savant académicien, cet appareil ne s'est pas répandu.

814. *Foyer à grille fixe et à distributeur direct.* — Cet appareil a été établi dans l'ancienne fabrique de produits chimiques de M. Payen, à Grenelle, pour alimenter un générateur à deux bouilleurs ; voici comment il était disposé. La profondeur de la grille correspondait à l'intervalle de l'extrémité antérieure de la chaudière et du mur traversé par les bouilleurs ; à la partie supérieure se trouvaient trois trémies correspondant à l'intervalle des bouilleurs et aux espaces qui les séparaient des murs latéraux ; chacune de ces trémies renfermait un cylindre broyeur qui laissait écouler la houille divisée, sur la grille. Les cylindres broyeurs faisaient moyennement 45 tours par minute, et versaient 15 kilog. de houille à l'heure sur le foyer. Ce système de distribution, exempt de mécanisme agissant dans le feu, d'une construction très-simple, et ne laissant point dégager sensiblement de fumée, paraissait supérieur aux autres ; cependant il ne s'est pas répandu davantage.

815. *Appareils de M. Player.* — Ces appareils ont été imaginés pour brûler les anthracites qui donnent peu de résidus et se délitent peu dans le foyer. Le foyer de M. Player se compose (*fig.* 140) d'une grille à barreaux étroits, au-dessus de laquelle se trouve un tube constamment rempli d'anthracite, qui, à partir de l'orifice inférieur, forme un talus s'étendant jusqu'aux bords de la grille, de sorte que le combustible descend à

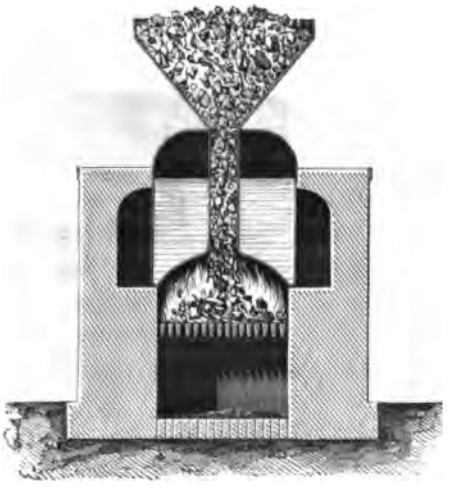


Fig. 140.

mesure qu'il se consume. Il n'y a point de porte à ouvrir et à fermer, par conséquent point de courant d'air froid sur le combustible ; et l'anthracite, étant échauffé progressivement à mesure qu'il descend, ne décrépite plus dans le foyer, et n'éteint plus celui qui est en ignition, en le refroidissant. L'alimentation est régulière, et le chauffeur n'a d'autre travail à faire que de remplir de temps en temps la trémie qui surmonte le tube d'alimentation et de régler l'activité de la combustion par le registre de la cheminée. La figure 140 représente cette disposition appliquée à une chaudière à vapeur à basse pression.

Une machine à vapeur a travaillé 72 heures consécutives avec un foyer à anthracite disposé comme nous venons de l'indiquer, sans qu'il ait été nécessaire de tisonner, de dégager la grille ni de faire tomber les escarbilles. L'anthracite employé était menu, sans être en poudre, et on le versait toutes les quatre heures dans la trémie. On avait placé de l'eau dans le cendrier, pour obtenir un peu de flamme. On a établi, dans la même usine, cinq foyers de forgerons, disposés de la même manière, et un four destiné à fondre la fonte ; tous ont donné de bons résultats. Depuis, on a appliqué la même disposition de foyers à des poêles et à des calorifères. Dans les foyers de forgerons et les foyers à réverbère, le canal qui alimente le foyer de combustible est placé latéralement.

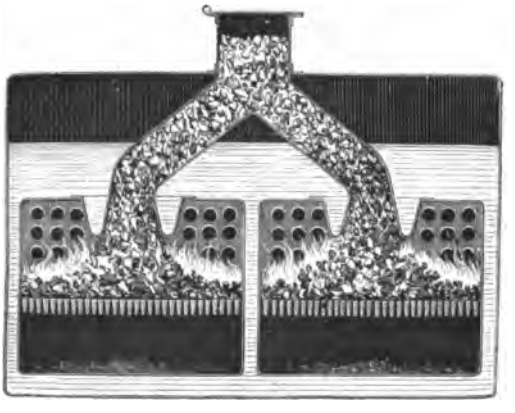


Fig. 141.

La figure 141 représente une coupe de la chaudière d'une machine à vapeur pour bateau, de la force de 24 chevaux, construite par M. Manby. La grille avait une surface égale aux $\frac{5}{4}$ de celles qui sont

ordinairement destinées à brûler le même poids de houille, et le tube d'alimentation, une section égale à $\frac{1}{4}$ de celle de la grille.

Ces foyers, qui ne sauraient bien fonctionner qu'avec des anthracites très-purs, décrépitant très-peu et en fragments réguliers, ne se sont nullement répandus.

Nous pouvons ajouter qu'en Amérique, où on brûle l'anthracite de Pensylvanie dans des foyers ordinaires, ce combustible brûle sans flamme, avec une régularité parfaite; une hauteur suffisante de combustible sur la grille suffit à une bonne combustion, aussi bien dans les appareils industriels que dans les appareils domestiques.

816. *Appareil de M. Juches, importé par M. Tailfer.* — Cet appareil, représenté en coupe verticale (*fig.* 142), se compose d'une

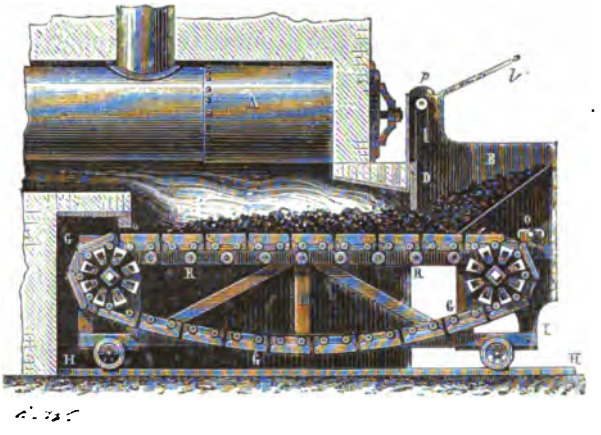


Fig. 142.

grille articulée, dont les barreaux sont perpendiculaires à la longueur du foyer et s'avancent régulièrement de l'avant à l'arrière, avec une vitesse de 27 à 30 millimètres par minute, emportant la houille menue dont elle s'est chargée en avant : A, chaudière ou bouilleur ; B, trémie renfermant la houille menue, dont l'introduction est réglée par l'élévation plus ou moins grande du registre D manœuvré par le levier *l*; R, R, rouleaux qui supportent la grille; GGG, grille articulée tournant sur des tambours polygonaux qui dirigent son mouvement ; ils sont fixés sur un bâti en fonte, mobile sur des galets et sur deux rails H, H; cette disposition permet de retirer la grille pour la réparer. Pendant le mouvement de la grille, le combustible doit brûler progressivement et arriver à l'extrémité à

l'état de mâchefer, qui tombe par une plaque inclinée dans une auge.

D'après les expériences de M. Combes, l'appareil de M. Tailfer est complétement fumivore, pourvu qu'il soit réglé parfaitement. On doit employer du charbon menu, car les morceaux un peu volumineux n'auraient pas le temps de brûler complétement ; la hauteur du registre doit être réglée par expérience, de manière que l'extrémité de la grille soit recouverte par une quantité de mâchefer suffisante pour prévenir l'introduction d'un trop grand excès d'air. Les expériences n'ont fait reconnaître aucune économie dans l'emploi de cet appareil, dans lequel le refroidissement sans cesse renouvelé de la grille est lui-même une perte de chaleur.

Il est trop compliqué, susceptible de dérangements fréquents et exige beaucoup de soin de la part du chauffeur ; en outre sa régularité mécanique présente un grave inconvénient pour les machines qui doivent s'arrêter pour les repas des ouvriers, ou pour tout autre motif, ou bien fonctionner à des forces variables. Il est difficile de régler la combustion proportionnellement à la vapeur demandée. Il a été cependant employé dans quelques établissements, parce qu'il présentait l'avantage de brûler de mauvaises houilles ; mais il est à peu près abandonné.

817. *Appareil de Cutler perfectionné par le docteur Arnott.* — En 1815, M. Cutler imagina pour les foyers domestiques la disposition suivante. L'encadrement du foyer était fermé en bas par une plaque de fonte verticale d'environ $0^m,30$ de hauteur, qui se terminait, dans le même plan, par une grille de $0^m,10$ à $0^m,15$ de hauteur ; derrière cette plaque, se trouvait une plaque horizontale ayant une surface un peu inférieure à la section horizontale du foyer, et qu'on pouvait faire monter ou descendre au moyen de deux chaînes passant sur deux poulies, d'une manivelle et d'un contre-poids. La plaque horizontale étant au niveau du sol, on la recouvrait de charbon jusqu'à la naissance de la grille, et on plaçait au-dessus, du coke qu'on allumait ; la chaleur, transmise de haut en bas à la houille, la décomposait, et les gaz, en traversant le coke incandescent, étaient brûlés par l'air qui traversait la grille ou qui arrivait au delà ; à mesure que le coke était consumé, on relevait la charge de charbon au moyen de la manivelle. Depuis, cet appareil a été perfectionné par le docteur Arnott ; il a remplacé les chaînes d'un aspect désagréable par une crémaillère située au-dessous de la plaque horizontale, et qu'on fait mouvoir par une tige de fer non à demeure ; il a appliqué

au foyer un rideau de tôle pour activer la combustion, et destiné surtout à allumer le coke au commencement du chauffage.

Les foyers du docteur Arnott consument très-bien la fumée dans les circonstances où ils sont établis, et ils sont surtout commodes, en ce sens que la charge de charbon peut suffire à la consommation d'une journée entière. Je reviendrai sur ces appareils en parlant des foyers domestiques.

818. *Appareils de M. Letestu et de M. Boquillon.* — M. Letestu et M. Boquillon ont imaginé, à peu près à la même époque, un appareil consistant en un cylindre horizontal formant une grille continue, mobile autour de son axe, et pouvant s'ouvrir sur une portion de sa surface. Le cylindre étant en partie rempli de coke incandescent, on y introduit de la houille par la porte, et, après l'avoir fermée, on retourne le cylindre de manière à placer la houille au-dessous du coke. Cette disposition ne peut évidemment être employée que pour les foyers domestiques; il est probable qu'avec un feu bien dirigé, elle produirait la combustion de la fumée, comme celle du docteur Arnott, mais elle est moins commode. J'ajouterai, d'une manière générale, que ces dispositions sont de nature à faciliter la formation de l'oxyde de carbone.

819. *Appareil de M. Dumery.* — L'appareil de M. Dumery repose sur les mêmes principes que ceux de M. Cutler et de M. Arnott; le foyer est alimenté par le bas, la houille se distille en chemin, et les gaz sont brûlés par l'air en traversant le coke incandescent. Voici la disposition d'un appareil remplaçant une grille ordinaire d'un générateur fixe à foyer extérieur. Les deux barreaux du centre de la grille sont conservés, les autres sont enlevés; dans les deux espaces rectangulaires restés libres de chaque côté des barreaux conservés, aboutissent deux tuyaux en fonte, à section rectangulaire, dont l'axe est circulaire, et qui sortent à travers les faces latérales du cendrier; la section de chacun d'eux dans le plan des barreaux conservés remplit exactement l'espace resté libre par les barreaux supprimés ; mais la section décroît à partir de ce point jusqu'à l'extrémité libre, de manière que chaque côté y soit plus petit à peu près de 0,12. Les deux extrémités extérieures des tuyaux sont libres, et les surfaces des parties intérieures des tuyaux sont garnies de fentes destinées à l'admission de l'air. Enfin, dans chaque tuyau, se trouve une espèce de piston destiné à pousser le charbon vers le milieu du foyer. Pour se servir de cet appareil, on remplit les tuyaux de charbon jusqu'à la naissance des fentes destinées à fournir l'air nécessaire

à la combustion ; on place au-dessus du coke, qu'on allume par la méthode ordinaire ; quand le coke est en partie consumé, au moyen des pistons, on pousse, vers l'extrémité intérieure des tuyaux, du combustible en grande partie transformé en coke ; on charge ensuite extérieurement les tuyaux, et on continue la même manœuvre.

Les appareils de M. Dumery ont été appliqués à un certain nombre de foyers ordinaires, et aussi à une locomotive du chemin de fer de l'Est, dans le but de remplacer le coke par la houille. Ils ont certainement l'avantage de brûler la fumée, du moins pour une consommation de combustible renfermée dans certaines limites et pour une certaine profondeur du foyer. On peut d'ailleurs faire varier à volonté l'épaisseur de la couche de coke, qui dépasse le plan des barreaux conservés.

On ne sait pas, jusqu'à présent, si dans cet appareil l'air extérieur arrive en volume seulement suffisant pour effectuer la combustion complète des gaz et du coke, ou si les gaz qui se dégagent du foyer renferment de l'oxygène libre ou de l'oxyde de carbone, et c'est une question du plus grand intérêt sous le rapport économique. Dans les expériences faites au chemin de fer de l'Est, on a constaté une augmentation de consommation très-sensible aussi bien pour la chaudière fixe que pour la locomotive, auxquelles l'appareil avait été adapté. De plus on a dû faire au foyer de fréquentes réparations. Cette disposition est complétement abandonnée.

On a essayé depuis une disposition qui a beaucoup d'analogie avec celle que je viens de décrire : l'appareil est composé de deux grilles horizontales, situées dans le même plan et séparées par un intervalle rectangulaire occupé par une caisse de même forme, à jour, dans laquelle se trouve un piston, supportant le combustible fraîchement chargé ; par le mouvement ascensionnel du piston, le combustible plus ou moins distillé se déverse de chaque côté sur la grille. Cet appareil, dont la régularité est chose incertaine, ne s'est pas répandu.

Foyers à injections de vapeur ou d'air sous la grille.

820. *Injection de la vapeur.* — L'introduction de la vapeur dans les foyers a été faite de deux manières différentes : on l'a fait arriver librement dans le cendrier au-dessous de la grille, ou d'abord dans des grilles creuses, d'où elle s'échappait par de petits orifices percés sur leurs faces latérales. Les détenteurs de brevet pour l'in-

jection de la vapeur sous la grille ou dans des grilles creuses ont publié, il y a quelques années, plusieurs résultats d'expériences faites dans différents lieux, d'où il semblait résulter de ce nouveau mode de combustion une économie de combustible qui s'élevait de 21 à 30 pour 100. Ces résultats paraissaient fort extraordinaires; car l'introduction de la vapeur pouvait faire produire de la flamme à des combustibles qui brûlent ordinairement sans flamme; mais, comme la quantité de chaleur produite par la formation de l'eau est égale à celle qui est absorbée par sa décomposition, il ne pouvait pas y avoir accroissement de chaleur. Aussi des expériences, faites, avec tout le soin convenable, par une commission de l'Institut, et d'autres, faites à la Manufacture des tabacs de Paris, ont-elles nettement démontré que l'introduction de la vapeur n'a aucune influence sur la quantité de chaleur développée.

821. *Injection d'air sous la grille.* — Depuis, on a imaginé de fermer les orifices du cendrier et d'injecter sous la grille un courant d'air froid. On a publié qu'on obtenait ainsi une très-grande économie de combustible. On avait même monté un grand atelier pour construire ces appareils; mais l'entreprise n'a pas réussi. On ne comprend pas en effet comment ces courants forcés auraient pu augmenter la puissance calorifique du combustible. Cependant cette disposition pourrait être utile pour les fourneaux mal construits qui ont un trop faible tirage, provenant ou d'une trop grande étendue des surfaces de chauffe, ou d'une trop petite section des carneaux et de la cheminée ; mais elle serait sans influence dans les fourneaux bien disposés, comme l'expérience le démontre. Cependant cette disposition a été conservée dans certaines forges pour les fours à réchauffer, parce qu'elle a permis d'employer des combustibles de moindre qualité.

822. *Injection de vapeur et d'air.* — On a enfin imaginé d'introduire dans le cendrier, hermétiquement fermé, un jet de vapeur par un tuyau placé au centre d'un tube s'ouvrant dans le cendrier et à l'extérieur. Le courant de vapeur produit un appel d'air et une pression dans le cendrier, lorsque le jet remplit tout le tuyau. Cette disposition est bonne quand les cheminées n'ont qu'un faible tirage, ou quand on refroidit complétement la fumée, et peut remplacer le tirage par une machine. Dans certaines circonstances elle serait même plus commode qu'un ventilateur, mais elle serait plus propre à diminuer l'effet utile qu'à l'augmenter. Dans tous les cas, il convient de surchauffer la vapeur.

Cette disposition peut particulièrement convenir dans le cas de houilles très-maigres ou anthraciteuses; on peut se servir à cet effet d'un des souffleurs qui ont été décrits (nos 734 et suivants).

823. *Appareil de M. Thierry.* — Dans cet appareil, de la vapeur prise sur la chaudière circule dans un serpentin en fer placé dans les parois mêmes du foyer, afin de s'y surchauffer; elle passe de là dans un tube posé horizontalement en arrière de la grille; par les petits trous dont ce tube est percé, la vapeur s'élance en jets; il en résulte un tourbillonnement qui produit le mélange des gaz et supprime la fumée noire. En soignant le service du foyer, comme cela est du reste toujours nécessaire, on obtient la fumivorité.

D'après un rapport de M. Burnat à la Société de Mulhouse (1866), la dépense de l'injection est en vapeur de 7 à 10 pour 100 du poids du combustible; l'appareil produirait une perte de 6,2 pour 100 qui pourrait être atténuée en n'employant l'injection que dans les instants qui suivent la charge. L'injection peut être employée, même quand le tirage du foyer n'est pas suffisamment énergique.

Foyers alimentés par de l'air chaud.

824. La substitution de l'air chaud à l'air froid dans les hauts fourneaux et dans les forges a produit partout une très-grande économie de combustible, et, dans certains cas, un accroissement dans la production journalière. On a d'abord expliqué cet effet par l'élévation de température qui résultait de l'emploi de l'air chaud. M. Berthier en a donné une autre raison généralement admise : elle repose sur l'hypothèse bien probable que l'affinité de l'air chaud pour le charbon est beaucoup plus grande que celle de l'air froid, et que, lorsqu'on emploie de l'air chaud, ce gaz se trouve entièrement dépouillé d'oxygène dans un très-court chemin. D'après cette hypothèse, la combustion se trouve concentrée dans l'ouvrage; la température y est alors beaucoup plus élevée que par l'emploi de l'air froid, et par suite elle est moins élevée au delà : ces deux circonstances sont favorables à l'économie du combustible. Le résultat important au point de vue de l'économie du combustible et du rendement des hauts fourneaux, c'est quela zone de la plus haute température se trouve moins étendue, et que la conversion de l'acide carbonique produit dans la zone des tuyères, en oxyde de carbone, est rendue plus prompte. La température de l'air chaud peut être d'autant moins élevée que le combustible a plus d'affinité pour

l'oxygène. Ainsi 200 à 250° suffisent pour les fourneaux marchant au charbon de bois, tandis qu'il faut 300 à 400° pour les fourneaux marchant au coke, et il est probable que l'anthracite exigerait une température encore plus élevée. On a même reconnu que, pour les hauts fourneaux au coke, il était avantageux d'aller encore plus haut; mais qu'il n'y a pas d'intérêt à atteindre ou à dépasser 800°.

825. On ne sait pas quelle serait l'influence de l'air chaud dans les foyers ordinaires, du moins avec injection sous la grille, aucune expérience décisive n'ayant été tentée à ce sujet. Mais l'injection de l'air chaud au delà du foyer dans une direction qui ne serait pas celle de la fumée, aurait certainement l'avantage de brûler les gaz comubstibles par son action directe et par le mélange que le mouvement de l'air injecté produirait dans les veines d'air et des gaz émanés du foyer.

Foyers à gaz.

826. Dans un assez grand nombre de cas, les opérations chimiques et principalement les opérations métallurgiques, qu'on produit par l'action de la chaleur, introduisent dans l'air brûlé des gaz combustibles, qui étaient autrefois complétement perdus et qu'on utilise maintenant. J'insisterai principalement sur les gaz qui s'échappent des hauts fourneaux, parce qu'ils sont presque entièrement formés d'azote, d'acide carbonique et d'oxyde de carbone; ce dernier gaz s'y trouve dans une assez forte proportion, qui peut s'élever à 30 pour 100 en volume et peut, par sa combustion complète, produire une grande quantité de chaleur et une température très-élevée. J'exposerai succinctement la longue série des essais qui ont été faits pour utiliser de différentes manières la chaleur des gaz des hauts fourneaux.

827. Le premier emploi de la flamme des hauts fourneaux paraît avoir été fait en 1812 par M. Aubertot. Il s'en servait pour la cuisson de la chaux et des briques dans des fours placés au gueulard. M. Berthier fit en 1814, sur les dispositions de M. Aubertot, un rapport détaillé qui contient l'indication de quelques usages auxquels on pourrait employer la flamme perdue des hauts fourneaux et des feux d'affinerie; mais M. Berthier ne prévoyait pas alors que, par la combustion des gaz qui sortent des gueulards, on pourrait produire les effets de quantité de chaleur et de température aujourd'hui réalisés, parce qu'à cette époque la puissance calorifique de l'oxyde de carbone était estimée bien au-dessous de sa valeur réelle.

828. En 1833, à la suite de la découverte de MM. Neilson et Taylor, relative à l'emploi de l'air chaud dans les hauts fourneaux, des calorifères de différentes formes furent placés sur les gueulards, pour y être chauffés à l'aide de la chaleur qui se développait naturellement en ce lieu.

De 1834 à 1835, M. Houzeau-Muiron plaça de même au gueulard des caisses dans lesquelles le bois était torréfié par la flamme perdue du haut fourneau, dans lequel le bois, après sa torréfaction, était utilisé comme combustible.

A la même époque, MM. Thomas et Laurens commencèrent à utiliser les gaz des hauts fourneaux pour chauffer des chaudières à vapeur destinées à faire mouvoir les machines soufflantes ; les foyers étaient placés à une petite distance des bords des gueulards ; les gaz étaient brûlés sous les chaudières par des courants d'air dont la section était réglée par des registres.

829. En 1838, M. Robin, directeur des forges de Niederbronn, proposa de chauffer, par les gaz perdus des hauts fourneaux, les chaudières à vapeur ou tous autres appareils des forges en les plaçant loin des gueulards. A cet effet, il prenait les gaz immédiatement au-dessous d'une plaque glissante, ou registre, qui tenait le gueulard fermé. L'écoulement était interrompu quand on chargeait le fourneau ; on subissait ainsi divers inconvénients, entre autres celui d'une certaine irrégularité dans le chauffage. En 1839, MM. Laurens et Thomas, en poursuivant leurs applications, arrivèrent à imaginer plusieurs dispositions importantes pour l'utilisation de ces mêmes gaz. Elles consistaient dans un mode de prise de gaz, dit trémie, à l'aide duquel on obtient un écoulement continu des gaz ; ceux-ci se rendent ensuite dans un appareil où ils se dépouillent des poussières qu'ils entraînent, et ensuite dans un foyer à gaz de disposition particulière.

La trémie, telle qu'elle a été appliquée, consiste en un tronc de cône métallique, tout ouvert, généralement plus large à sa base qu'à sa partie supérieure, sans que cependant ses parois soient jamais en continuation de celles de la cuve. Elle plonge dans un élargissement pratiqué à la partie supérieure de la cuve des hauts fourneaux pour former ainsi un réservoir de gaz duquel partent un ou plusieurs tuyaux destinés à porter les gaz aux divers foyers utilisateurs.

La capacité de la trémie est réglée de manière à contenir, suivant les circonstances, deux ou trois charges qui opposent ainsi un

obstacle permanent au départ des gaz par le gueulard. Les ingénieurs précités augmentaient habituellement le diamètre des gueulards et exhaussaient les hauts fourneaux dont ils employaient les gaz, car ils partaient de ce principe (contraire aux errements préconisés à cette époque en Allemagne, mais abandonnés depuis) que le gaz ne doit être recueilli qu'au gueulard même, ou non loin de celui-ci, c'est-à-dire quand il n'exerce plus d'action utile à la préparation du minerai.

Le chargement des hauts fourneaux et la prise de leurs gaz sont des opérations intimement liées entre elles. Les combinaisons qu'il y a lieu d'adopter à cet égard doivent varier suivant les matières à traiter et suivant les hauts fourneaux eux-mêmes.

A partir de 1841, MM. Thomas et Laurens proposèrent diverses dispositions de prises de gaz autres que la trémie simple; parmi elles, nous citerons la fermeture hydraulique des gueulards, en 1842, employée sur les fourneaux au coke; et, en 1844, le cône métallique suspendu à un balancier qui sert à l'appliquer, pour opérer la fermeture, contre le rebord du gîte annulaire en fonte au centre duquel il est placé. Une fois la charge mise au-dessus du cône, on abaisse celui-ci pour la laisser tomber dans le gueulard. Les auteurs faisaient observer que l'emploi du cône, qui pouvait se combiner aussi avec celui de la trémie, devait être réglé de manière à procurer l'avantage de porter la charge à la circonférence du gueulard. Ils conseillaient, en conséquence, l'emploi du cône mobile ou du cône fixe suivant les cas.

830. Maintenant que l'application des gaz des hauts fourneaux est très-répandue en France et à l'étranger, on trouve divers agencements de prise de gaz et de mode de chargement; mais ils relèvent tous de cette idée : la fermeture plus ou moins parfaite, plus ou moins permanente des gueulards, nécessaire surtout pour les hauts fourneaux d'un grand diamètre. Nous parlerons plus loin du but que l'on doit atteindre plus spécialement par cette fermeture.

831. En Angleterre, où l'utilisation des gaz des hauts fourneaux ne s'est un peu propagée que depuis quelques années, alors que depuis vingt-cinq ans elle est à peu près générale en France, la prise de gaz est opérée assez souvent à l'aide de l'appareil de fermeture connu sous le nom de *cup and cone;* cet appareil, d'après les publicistes anglais, aurait été proposé en Angleterre pour la première fois en 1850, et essayé aux usines d'Ebbw Vale. Le gueulard est

recouvert d'une cuvette annulaire en fonte, ouverte en son milieu. Dans cette ouverture est placé un cône métallique, suspendu à un balancier au moyen duquel on l'appuie contre le rebord de la cuvette pour effectuer la fermeture du gueulard. On met la charge sur le cône, dans la cuvette, puis on abaisse le cône et la charge tombe dans le haut fourneau.

Le départ du gaz a lieu par des tuyaux ou canaux, situés au-dessous du gueulard.

832. En Allemagne, on trouve, entre autres modèles de prise de gaz, le *cup and cone* modifié dans le but d'opérer le départ des gaz au centre du gueulard et au-dessus de celui-ci. A cet effet, le cône se termine par un tuyau, ou cheminée, mobile avec le cône, et dont l'extrémité pénètre par l'intermédiaire d'un joint hydraulique dans le branchement qui aboutit à la conduite générale du gaz de l'usine. Ces deux modes de fermeture ont été imités dans plusieurs forges de France.

833. Ces divers modèles de fermeture et de prise de gaz peuvent donner de bons résultats quand ils sont appropriés aux hauts fourneaux et aux matières que l'on y traite ; mais il est un principe, émis par MM. Laurens et Thomas, qui domine cette question et qui est passé dans la pratique, c'est que, pour utiliser les gaz d'un haut fourneau, et surtout d'un haut fourneau au coke, sans le déranger, sans changer la nature de son produit, il faut éviter toute espèce de tirage au gueulard ; bien plus, il est utile d'augmenter notablement la pression qui existait dans la cuve avant qu'on recueillît les gaz ; ainsi, dans des hauts fourneaux au coke, où la pression au gueulard était à peine sensible, lorsqu'il était ouvert, il est avantageux de régler la marche de façon à obtenir au gueulard une pression de 4, 5; 6 centimètres d'eau, et parfois plus encore.

On comprend que les praticiens devaient être peu disposés à suivre la règle posée par ces ingénieurs ; car faire descendre les gaz sur le sol de l'usine, les faire voyager souvent à de grandes distances des hauts fourneaux, ne semblait praticable qu'à l'aide d'un tirage énergique ou d'un ventilateur aspirant. Les applications des gaz qui n'ont pas réussi le doivent, pour beaucoup, à ce qu'on n'a pas suivi la règle dont il s'agit.

La pression au gueulard est bien autrement efficace pour obtenir une bonne répartition des gaz dans la cuve que la prise de gaz centrale au-dessus ou au-dessous du gueulard et surtout que celle

qui s'exécute par un tuyau central, descendant par le gueulard à plusieurs mètres au-dessous de celui-ci.

834. *Poussières entraînées par les gaz.* — Dans toutes les applications des gaz au gueulard, ces poussières sont un embarras, d'autant plus nuisible que les opérations effectuées par la combustion des gaz sont plus sujettes à être viciées par la présence de ces résidus. Il faut donc les retenir avant que les gaz parviennent aux fours utilisateurs. A cet effet MM. Thomas et Laurens ont employé un appareil fondé sur les mêmes principes que ceux que nous décrirons plus tard pour séparer la vapeur de l'eau qu'elle entraîne. Il consiste dans une cloche fixe de forme allongée, plongeant par la porte inférieure dans un vase ouvert et plein d'eau. Le gaz arrive au plafond de la cloche, contre la surface de l'eau par conséquent ; les matières en suspension, en vertu de leur inertie, sont projetées dans l'eau où elles restent, tandis que le gaz, ainsi nettoyé, se dégage par le tuyau de sortie placé également au plafond de la cloche ; mais, à l'extrémité opposée, l'appareil est ordinairement disposé pour que le gaz y soit soumis à plusieurs projections successives que l'on obtient au moyen de plusieurs cloisons établies dans l'appareil. De plus, on peut en retirer les boues qui s'y déposent sans qu'il en résulte de suppression dans le passage des gaz à travers l'épurateur. On voit que celui-ci joue en même temps le rôle de soupape de sûreté par sa cuve à eau, en cas d'explosion causée par la négligence des ouvriers.

835. *Foyers à gaz.* — Ces foyers se divisent en deux classes :

1° Ceux dans lesquels la température doit être seulement suffisante pour le chauffage des chaudières à vapeur et des appareils à air chaud ;

2° Les foyers à très-haute température.

Les foyers du premier genre peuvent avoir une disposition très-élémentaire, si le haut fourneau fournit plus de gaz qu'il n'en faut pour le chauffage à effectuer. Mais s'il y a plusieurs appareils à chauffer, si l'on doit tirer tout le parti possible des gaz, les foyers doivent alors recevoir le gaz en nappes, d'une certaine épaisseur cependant, qu'entoure une mince lame d'air. Ce sera une seule buse plate, si le foyer n'a pas une grande étendue, ou, dans l'autre cas, une série de lames de gaz dans les intervalles desquelles l'air extérieur afflue pour la combustion. Dans leurs foyers, qui sont disposés de cette façon, MM. Thomas et Laurens faisaient arriver les lames de gaz tantôt au plafond du foyer de façon à former un

foyer à flamme renversée, tantôt à l'avant du foyer, le gaz suivant une direction horizontale. Ils ont reconnu qu'il faut avoir soin de ne pas donner de l'air en excès dans le gaz à brûler, mais qu'il faut le ménager et, dans tous les cas, le faire arriver en minces filets.

Les foyers du deuxième genre, destinés à produire de hautes températures par la combustion des gaz des hauts fourneaux, sont alimentés par de l'air affluant avec pression. Diverses combinaisons ont été employées pour atteindre ce but. Nous citerons d'abord celle que M. Faber du Faur a adaptée au four à puddler existant sur le haut fourneau de Wasser-Alfingen. Elle consistait en un canal de maçonnerie dans lequel arrivait le gaz du haut fourneau, et en sept buses, placées en tête de ce canal, où elles projetaient l'air de combustion assez faiblement échauffé. Par suite de cette disposition, bien du gaz échappait à la combustion. En outre, les gaz étaient pris dans le haut fourneau, aux deux tiers de sa hauteur, afin de les avoir plus riches et d'obtenir ainsi la température nécessaire. L'allure du haut fourneau était des plus mauvaises, aussi cet agencement a-t-il été abandonné pour toute espèce d'application des gaz.

MM. Thomas et Laurens, partis de considérations différentes, disposèrent leur foyer de manière à obtenir une combustion complète et la haute température nécessaire tout en prenant les gaz au gueulard. La construction de ces foyers est fondée sur divers principes : le premier consiste à opérer la combustion sous une certaine pression; le second, à répartir l'air en filets minces et multipliés dans le gaz, afin de concentrer la chaleur sur une étendue limitée et d'avoir une combustion complète sans excès sensible d'air; le troisième, à donner au gaz et à l'air des vitesses différentes; le dernier enfin, qui est le plus important, consiste à mettre le gaz et l'air en contact après les avoir fortement échauffés l'un et l'autre, car la température obtenue augmente d'autant plus qu'elle est produite par des corps à température plus élevée. Cet échauffement des gaz et de l'air à une température de 500° environ, était produit par la chaleur perdue des fours utilisateurs dont il récupérait ainsi la chaleur qui n'avait pas été utilisée sur la sole de travail.

Un appareil constitué d'après ces principes par MM. Thomas et Laurens, contenait, pour un four à puddler ou à réchauffer, une trentaine de jets d'air chaud de quelques millimètres de diamètre; ils débouchaient chacun au centre d'ouvertures, ou buses, en fonte ou

en poterie, plus larges, par lesquelles le gaz affluait sous une pression de 3 à 6 millimètres d'eau. La pression qui existait dans l'intérieur des fours tendait à faire sortir des jets de flamme par les ouvertures de travail des portes; aussi on les refoulait par des jets d'air extérieur pendant qu'on travaillait dans le four.

836. Il résulte des analyses faites par M. Bunsen, sur la composition des gaz des hauts fourneaux, que la quantité d'acide carbonique diminue et que celle d'oxyde de carbone augmente à mesure que le gaz est pris à des profondeurs croissantes. Ce chimiste remarque que le gaz, pris à une distance du gueulard égale à peu près à un tiers de la hauteur du fourneau, et qui contient alors 0,33 d'oxyde de carbone, exige pour sa combustion un volume d'oxygène égal à celui qu'il renferme; et il en conclut, d'après la théorie de Welter, que la quantité de chaleur, utilisée dans le fourneau, est inférieure à la moitié de celle que le charbon employé peut développer, et que ce gaz pourrait produire par sa combustion la température nécessaire à la fusion de la fonte. Mais ces calculs tendraient à faire regarder cette opération comme impossible par la combustion des gaz pris au gueulard, puisque ceux-ci ne contiennent plus que 0,20 à 0,25 d'oxyde de carbone; cette impossibilité n'existe pas, la pratique l'a démontré. D'ailleurs, on sait que la loi de Welter est inexacte.

837. D'après les analyses d'Ebelmen, faites postérieurement aux précédentes, et toutes celles qui ont été exécutées en diverses circonstances, il est également établi que les gaz qui s'élèvent dans les hauts fourneaux renferment des quantités d'oxyde de carbone décroissant des tuyères au gueulard. Comme il est important de connaître la composition de ces gaz pour les divers genres de hauts fourneaux, afin de pouvoir déterminer leur valeur calorifique dans les applications que l'on projette, nous donnons ci-dessous un certain nombre d'analyses effectuées par divers chimistes; tous les gaz analysés ont été recueillis au gueulard ou à proximité de celui-ci. On ne doit pas oublier en effet que c'est là seulement que les gaz doivent être pris pour ne pas déranger l'allure du fourneau.

Les nombres du tableau suivant sont donnés en volumes.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Oxyde de carbone.....	24.20	23.51	13.11	24.65	23.85	28.61	28.93	28.06	30.50	25.20	25.97
Hydrogène.....	1.33	5.82	»	5.19	4.31	2.71	3.04	0.97	0.10	0.10	6.73
Hydrogène protocarboné..	3.36	»	»	0.93	1.33	0.20	»	1.48	»	»	3.75
Hydrogène bicarboné.....	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0.43
Acide carbonique.....	8.77	12.88	16.39	12.01	11.95	11.39	11.39	9.35	11.80	17.30	7.77
Azote.....	62.24	57.79	70.50	57.22	58.50	56.64	57.06	59.64	57.60	53.40	55.35

Les nos I, II, III, IV et V donnent les analyses des gaz de hauts fourneaux au charbon de bois.

Les nos VI, VII, VIII, IX et X appartiennent à des hauts fourneaux au coke, et le n° XI à un haut fourneau à la houille crue.

N° I. Analyse eudiométrique du docteur Bunsen, de Cassel, sur le haut fourneau de Weckeragen. Le gaz était pris à 0m,80 au-dessous du gueulard.

N° II. Analyse d'Ebelmen sur le fourneau de Clerval, de 8m,67 de hauteur, marchant en fonte grise, à l'air chauffé à 180°; la consommation de charbon de bois dur, pesant 230 kilog. le mètre cube, était de 1474 kilog. à la tonne de fonte, consommation sensiblement supérieure à la consommation ordinaire.

N° III. Analyse donnée par M. Tunner pour le haut fourneau de Vrbna (Styrie) au charbon de bois tendre avec une consommation de 700 kilog. à la tonne de fonte blanche rayonnée; minerai à 50 p. 100 de rendement. M. Tunner ajoute que l'eudiomètre n'avait pas une division assez fine pour mesurer d'aussi petits volumes que ceux des hydrogènes carbonés divers, et qu'en conséquence la proportion d'azote et d'oxyde de carbone est un peu trop forte, comparativement à l'acide carbonique. Le gaz a été pris sur le haut fourneau à 11m,38 de hauteur, à 3m,42 au-dessous du gueulard.

N° IV. Analyse d'Ebelmen sur le haut fourneau de Clerval, porté à 10m,00 de hauteur et marchant à l'air froid en fonte pour seconde fusion, avec une consommation de 1270 kilog. par tonne; le gaz était pris sur le porte-gaz, allant à la chaudière de la machine, et qui recevait les gaz à l'aide d'une trémie d'environ 1m,00 de hauteur; la prise de gaz a eu lieu, alors qu'on était sur le point de charger.

N° V. Analyse de gaz pris de la même manière et au même point, mais un quart d'heure après la charge.

Nos VI et VII. Analyse d'Ebelmen sur le haut fourneau au coke,

n° 6, de Seraing (Belgique); hauteur, 15m,00; consommation, 1500 kilog. de coke ; production journalière : 17 tonnes de fonte blanche; la prise de gaz était faite à 0m,30 au-dessous du gueulard.

N° VIII. Analyse sur le même haut fourneau des gaz pris à 1m,22 au-dessous du gueulard; pendant ces essais, l'air du fourneau de Seraing était chauffé à 100° seulement.

N° IX. Analyse donnée par M. L. Bell des gaz du gueulard de l'un de ses hauts fourneaux de Clarence-Works (Angleterre) dont la hauteur était de 14m,60; consommation de 1450 kilog. de coke par tonne de fonte; l'air était chauffé à plus de 500°; production journalière : 30 tonnes de fonte de forge.

N° X. Analyse des gaz du gueulard d'un haut fourneau de la même usine : hauteur, 24m,40 ; consommation, 1125 kilog. ; l'air était plus chaud ; production : 38 tonnes par jour.

N° XI. Analyse de MM. Bunsen et Playfair des gaz pris à 1m,50 au-dessous du gueulard du haut fourneau d'Alfreton (Angleterre), marchant à la houille crue.

Nous n'avons pas donné dans le tableau ci-dessus les analyses, maintes fois reproduites déjà, d'Ebelmen sur les hauts fourneaux au coke de Vienne et de Pont-Créqui (Isère), parce que ces hauts fourneaux n'étaient pas dans des conditions normales de dimensions et de marche; elles ne pouvaient donner lieu à des indications utiles; aussi cette conclusion particulière qu'en tire leur auteur, que les hauts fourneaux au coke brûlent deux fois plus de carbone que les hauts fourneaux au charbon de bois est-elle complétement erronée.

L'analyse des gaz des hauts fourneaux présente de sérieuses difficultés; aussi les nombres obtenus peuvent-ils fournir des indications utiles, mais qui ne sont pas absolues; les gaz extraits pour l'analyse ont toujours été recueillis pendant un temps trop court pour qu'ils représentent une moyenne certaine du flux gazeux qui les a fournis.

Nous ne donnerons pas non plus les analyses de gaz puisés à différentes profondeurs dans les hauts fourneaux, parce qu'elles n'intéressent que la métallurgie et que de plus la façon dont on les a recueillis ne peut en général mener à aucune détermination exacte de leur composition dans la zone où ils ont été pris. Telles qu'elles sont cependant, elles ont pu servir à confirmer les prévisions théoriques de la science sur le fonctionnement des hauts fourneaux.

On trouvera au tableau (304 *bis*) les divers éléments relatifs à la combustion des gaz dont nous avons donné la composition.

Foyers dans lesquels les combustibles solides sont d'abord transformés en gaz combustibles (Gazogènes).

838. Les foyers à gaz ont de grands avantages sur les foyers ordinaires; la combustion peut y être rendue complète, en employant seulement le volume d'air rigoureusement nécessaire; on peut faire varier à volonté l'intensité du foyer, laisser dans les produits de la combustion de l'air ou du gaz non altérés, et enfin obtenir un effet régulier et continu; ces résultats sont faciles à atteindre en réglant, conformément au but qu'on se propose, les accès de l'air et du gaz.

Ces avantages, bien constatés par toutes les expériences qui avaient été faites en employant les gaz des hauts fourneaux dans des appareils bien disposés, ont évidemment conduit à transformer les combustibles solides en gaz combustibles, qu'on brûle ensuite dans des foyers analogues à ceux que nous avons décrits précédemment. Les premières recherches sur cet objet ont été faites en France par MM. Thomas et Laurens, et par M. Ebelmen, et en Allemagne par M. Faber-Dufaur.

La question de priorité d'invention relative à ce procédé, qui avait été soulevée à l'occasion des générateurs de gaz installés aux forges d'Audincourt, sur les conseils de M. Ebelmen, fut résolue en faveur de MM. Thomas et Laurens, à la suite de longs débats judiciaires et d'une laborieuse expertise; les travaux et publications de M. Ebelmen, ainsi que les essais tentés en Allemagne, furent reconnus ne pouvoir être valablement opposés aux travaux de MM. Thomas et Laurens et aux brevets pris par leurs soins.

Voici les principales dispositions imaginées par ces derniers ingénieurs, qui donnèrent à leur premier appareil le nom de *gazogène*, dénomination maintenant en usage pour désigner les procédés de conversion préalable des combustibles solides en gaz combustibles.

Le combustible est chargé dans un fourneau ayant intérieurement la forme d'un cylindre vertical, ou d'un prisme fermé à sa partie supérieure; la forme d'un petit haut fourneau est celle qui convient généralement le mieux. Afin d'opérer le chargement sans produire d'interruption dans l'écoulement du gaz, le gueulard est muni d'une trémie plongeant dans la cuve, ou d'une trémie supérieure avec couvercle mobile, dont l'orifice inférieur se ferme par un cône en fonte que l'on descend par un mouvement de bascule pour laisser tomber la charge. Cet emploi du cône était en même temps proposé

par les mêmes ingénieurs pour la fermeture et le chargement des hauts fourneaux.

L'air comprimé par une soufflerie, à une pression qui doit varier suivant la nature des combustibles, est lancé dans une ou plusieurs tuyères établies au bas du fourneau, en contre-haut cependant d'une sorte de creuset réservé à la partie inférieure. Ce creuset est fermé sur sa face par une *dame* qui permet de faire écouler les laitiers, si on marche avec liquéfaction des matières étrangères à l'aide d'un fondant approprié à la nature de celles-ci, ou, dans le cas contraire, par une porte qui sert à enlever les résidus par un nettoyage à la main.

Le gazogène fonctionne régulièrement et pratiquement avec de l'air seul, mais une injection complémentaire de vapeur d'eau a l'avantage de diminuer la température des gaz à leur sortie, en augmentant en même temps leur richesse combustible.

En introduisant des poids d'air et de vapeur dans le rapport de 35 à 1, la chaleur développée par la formation de l'oxyde de carbone est suffisante pour décomposer la vapeur d'eau, et donner des gaz à une température inférieure à 500°. Il convient d'employer de la vapeur surchauffée. On l'injecte immédiatement au-dessous de la zone des tuyères ; on peut aussi, si le combustible le permet, faire l'injection au moyen d'un appareil spécial qui fait servir le jet de vapeur très-surchauffée au soufflage de l'air lui-même. Le gazogène doit avoir assez de hauteur pour contenir une épaisseur de combustible telle qu'au moment où on fait la charge, tout l'oxygène de l'air soit transformé en oxyde de carbone. Cette hauteur varie de 1 mètre à 3 mètres ; la plus petite convient au charbon de bois, la plus grande, au coke.

La disposition qui vient d'être décrite est applicable, en lui donnant les dimensions convenables, au bois, aux fraisils, etc., aux anthracites, à la tourbe, au coke, aux houilles sèches et même aux houilles demi-grasses non sujettes à trop de boursouflement. Les houilles grasses mélangées en certaines proportions avec des houilles sèches ou du coke peuvent également être traitées ainsi.

839. Pour les houilles grasses, les auteurs proposaient d'établir au gueulard du gazogène un four horizontal, dans lequel on soumettait préalablement, à la distillation par le passage des gaz déjà formés, la charge qui, une fois réduite en coke, était poussée dans le gazogène. L'idée de MM. Thomas et Laurens, qui ressort de cette description, était de parvenir à constituer un appareil simple, peu

encombrant et néanmoins capable de fournir un grand volume de gaz, et tout particulièrement d'obtenir une composition constante du gaz. Les variations de cette composition en amènent, en effet, de correspondantes dans la température des fours utilisateurs qui, par suite, chauffent tantôt trop, tantôt trop peu, état de choses qui ne peut être admis dans les forges pour les fours à puddler ou à réchauffer. Cet appareil n'était pas limité dans sa puissance et on pouvait desservir plusieurs fours par un seul gazogène, circonstance favorable elle-même à l'uniformité de composition des gaz.

Les gaz, amenés aux fours, y étaient brûlés par de l'air chauffé à la chaleur perdue des fours eux-mêmes, ainsi que les gaz, s'ils arrivaient à une température trop faible. La combustion, dans les fours, avait toujours lieu sous pression, condition qui a toujours été reconnue essentielle pour chauffer à l'aide des gaz.

840. Nous résumons ci-après les analyses opérées par M. Ebelmen sur les gaz produits par des appareils de ce genre.

Les gazogènes établis à Audincourt pour des réchauffages de fer marchaient avec de la braise, ou des fraisils de charbon de bois convenablement nettoyés. Avec le roulement à l'air seul, la composition moyenne des gaz était :

	En volume.	En poids.
Acide carbonique.....	0,50	0,80
Oxyde de carbone.....	33,30	33,74
Hydrogène.....	2,80	0,20
Azote.....	63,40	65,26

En employant de l'air renfermant un cinquième de son volume de vapeur, les gaz étaient formés de 5,6 acide carbonique ; 27,2 d'oxyde de carbone; 14,2 d'hydrogène et de 53,2 d'azote en volumes. Si l'on calcule la température de combustion maxima que peuvent produire ces gaz, on arrive à des températures voisines de 1900 et 2000° ; mais ces températures se trouvent considérablement réduites par la dissociation (voir le tableau 304 *bis*).

Les combustibles particuliers, les déchets, qu'on employait à Audincourt, se trouvèrent considérablement réduits par suite du changement de régime de l'usine, et le travail au gazogène fut abandonné dans cette forge. Des gazogènes au bois préalablement desséché ont été établis, sur une grande échelle, en Carinthie; d'autres au lignite, à la tourbe ou à la houille, en Silésie, postérieurement aux travaux précités.

Ebelmen a donné pour le gaz d'un gazogène alimenté au coke la composition suivante en volumes :

Acide carbonique.....	0,73
Oxyde de carbone.....	33,54
Hydrogène.....	1,47
Hydrogène sulfuré.....	0,16
Azote.....	64,10

841. En employant de la tourbe, Ebelmen a reconnu que les 2/3 seulement de l'oxygène de l'air étaient transformés en oxyde de carbone; ainsi le charbon de tourbe fortement chauffé n'agit pas sur l'acide carbonique, aussi bien que le charbon de bois; il est probable qu'avec une plus grande hauteur de combustible, on produirait une transformation complète. Sous ce rapport, le charbon de tourbe se rapproche, du coke; car dans les mêmes circonstances, il faut une plus grande hauteur de coke que de charbon de bois pour convertir l'oxygène de l'air en oxyde de carbone. Dans un cubilot, l'air peut traverser $1^m,50$ de coke sans qu'il y ait plus de 1 : 3 de l'oxygène de l'air transformé en oxyde de carbone; si l'on employait du charbon de bois, la formation de l'oxyde de carbone serait plus rapide, et d'autant plus que le charbon serait plus combustible. On voit alors pourquoi, dans les fourneaux à vent, on obtient une température plus élevée avec le coke qu'avec le charbon de bois, et pourquoi on n'emploie jamais de charbon de bois dans les cubilots. Ces différences d'action du coke et du charbon de bois sur l'acide carbonique, pour le transformer en oxyde de carbone, proviennent probablement de la combustibilité plus ou moins grande des charbons et de l'état dans lequel se trouvent les résidus de la combustion.

842. Il résulte des analyses précédentes de M. Ebelmen sur les gaz des générateurs, que l'acide carbonique qui se forme d'abord est décomposé par le charbon ; qu'il en est de même de la vapeur d'eau, pourvu que le combustible traversé ait une assez grande épaisseur; dans ces actions il n'y a point de chaleur perdue, car la puissance calorifique du combustible se retrouve en totalité dans celle des gaz produits, augmentés de la quantité de chaleur qu'ils renferment. Mais l'eau qui existe toute formée dans le combustible et celle qui se forme, sans donner de chaleur par la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène qui s'y trouvent en proportions convenables, produisent nécessairement un abaissement de température, puisque cette eau se transforme en hydrogène et en oxyde de carbone qui ont une

certaine puissance calorifique. Cet abaissement de température doit compenser exactement la puissance calorifique des gaz combustibles qui proviennent de la décomposition. Aussi la quantité d'eau que peut renfermer le combustible, ou celle de la vapeur qu'on peut introduire, ne peut-elle pas dépasser une certaine limite, pour que la température se maintienne au point nécessaire à la production des actions chimiques; quand l'eau est fournie par de la vapeur, on peut dépasser la limite en question en introduisant de la vapeur surchauffée. Il est important que les gaz combustibles ne sortent pas du générateur à une température élevée, quand ils ont à parcourir un long trajet avant de se rendre aux foyers, à cause de la chaleur qui serait perdue dans le trajet; mais comme, dans certains cas, il est important qu'ils soient très-chauds, on les échauffe au moyen d'une partie de la chaleur perdue du four lui-même quand ils y arrivent trop froids.

843. Pour mieux comprendre les phénomènes qui se produisent dans les appareils dont il est question, et surtout l'influence de la vapeur d'eau, considérons un fourneau vertical en maçonnerie épaisse, ayant la forme d'un petit haut-fourneau, rempli d'un combustible ne renfermant que du carbone et des matières fixes qui se renouvelle par la partie supérieure, maintenue fermée dans les intervalles de chargement ; à la partie inférieure se trouvent des tuyères qui injectent de l'air sous une certaine pression. Quand le régime sera établi, l'oxygène de l'air se transformera d'abord en acide carbonique, et ce gaz, en s'élevant à travers le combustible incandescent, se transformera progressivement en oxyde de carbone, et la transformation sera complète, si la hauteur du combustible est suffisante; cette hauteur dépend de la nature du combustible, de la pression du vent et de la quantité d'air injecté. L'oxygène étant entièrement transformé en oxyde de carbone, pour chaque kilogramme de charbon brûlé, la quantité de chaleur produite sera de 2473 unités de chaleur, et comme on aura introduit $5^k,73$ d'air renfermant $4^k,41$ d'azote, et qu'il se sera formé $2^k,33$ d'oxyde de carbone, la température du gaz sera donnée par l'équation

$$t(4{,}41 \cdot 0{,}244 + 2{,}33 \cdot 0{,}248) = 2473 - 1{,}65t ; \quad \text{d'où} \quad t = 1498° ;$$

température très-élevée, quoique la quantité de chaleur dégagée soit assez faible, parce que le volume d'air employé est très-petit. On est loin d'atteindre cette température dans les gazogènes ; les com-

bustibles contiennent tous une quantité d'eau plus ou moins grande qui, par sa décomposition, absorbe beaucoup de chaleur ; il en est de même de l'air introduit dans le gazogène : nous avons vu qu'à 15° et quand l'air est aux trois quarts saturé, il contient environ 1 pour 100 de vapeur d'eau. Si l'on ajoute à cette perte celle qui résulte de la présence des cendres et du rayonnement du fourneau, on conçoit que la température doive s'abaisser notablement.

844. Pour obtenir l'influence de l'eau, supposons que l'air amène une quantité de vapeur qui soit une fraction x de la quantité de charbon brûlé, et appliquons le calcul à un kilogramme de carbone pur.

La quantité x d'eau contient un poids $\frac{8x}{9}$ d'oxygène et par suite la quantité d'oxygène que le charbon devra emprunter à l'air sera représentée par $1{,}333 - \frac{8x}{9}$; la quantité d'azote que renfermera l'air de la combustion sera

$$\left(1{,}333 - \frac{8x}{9}\right)\frac{77}{23}$$

la composition du gaz obtenu sera donc :

Oxyde de carbone.....	2,333
Hydrogène.....	$0{,}111x$
Azote.....	$4{,}44 - 3x$

La quantité de chaleur produite se composera de la quantité de chaleur fournie par la formation de l'oxyde de carbone diminuée de celle qu'exige la décomposition de l'eau, laquelle est de 3829 calories par kilogramme. On aura donc

$$t[2{,}333 \times 0{,}248 + 0{,}111x \times 3{,}404 + (4{,}44 - 3x)\,0{,}244] = 2473 - 3829x.$$

Si l'on donne successivement à x les valeurs :

0,05 6,10 0,20 0,30 0,40,

on trouve pour t :

1388° 1285° 1094° 862° 596°.

En supposant un rayonnement du fourneau égal à 20 pour 100 de la quantité de chaleur produite, ces températures s'abaisseraient à :

1041° 963° 820° 645° 447°.

Dans le cas d'un gazogène marchant à la houille, les pertes peuvent être encore augmentées par suite de l'absence de la combustion d'une partie du carbone et de la formation d'hydrogènes carbonés.

Enfin, lorsque le combustible contient des cendres, ces cendres emportent une certaine quantité de chaleur dont il faudrait tenir compte ; de plus elles diminuent proportionnellement à la quantité de matières combustibles restant dans le charbon, la quantité d'eau nécessaire pour produire un abaissement de température déterminé.

Si l'air, qui est introduit pour effectuer la combustion partielle du carbone, et le combustible lui-même contenaient de la vapeur d'eau en quantité croissante, la température du foyer s'abaisserait progressivement : à une certaine limite toute la vapeur serait décomposée, et la température des gaz serait celle où la décomposition de la vapeur cesse d'avoir lieu ; pour un plus grand excès de vapeur, une partie échapperait à la décomposition et la température du mélange s'abaisserait par suite seulement de la chaleur enlevée par la vapeur dans son échauffement.

845. Malgré les avantages que présente la formation directe du gaz, avantages au rang desquels il faut placer d'abord celui de pouvoir employer des combustibles inférieurs ou négligés, le gazogène à tuyère ne s'est pas propagé ; son installation était en effet plus coûteuse que celle d'un four à la houille, à cause du moteur et des appareils à chauffer l'air et les gaz de la combustion. Mais ces difficultés eussent été probablement surmontées, sans les discussions qui furent soulevées à l'origine et qui vinrent en paralyser l'essor.

M. Krans, dans une étude sur le four Siemens (Paris, Lacroix), résume ainsi les avantages que présenteraient les gazogènes à cuve et à tuyère : « Dans un fourneau à cuve, on transformerait sans difficulté en gaz les combustibles maigres, le petit coke, les charbons sales..... Le four à cuve aurait sur un gazogène à grille le grand avantage de pouvoir être conduit d'une manière certaine, sans difficulté sérieuse, et l'on ne serait plus, pour la génération du gaz, la partie essentielle du procédé, à la merci du travail plus ou moins inhabile d'un ouvrier. »

846. L'idée d'appliquer aux divers chauffages industriels, au lieu des combustibles en nature, les gaz produits par leur demi-combustion au moyen de l'air atmosphérique a été reprise en Angleterre, en 1861, par MM. Siemens frères. Les premières installations faites en

France dans ce but dataient de 1841, mais les moyens d'exécution n'ont pas été les mêmes dans les deux pays.

Le point de départ de MM. Siemens avait été, en 1856 et 1857, la régénération de la chaleur perdue des fours de travail au moyen d'un appareil en briques appelé régénérateur. Il avait pour objet de chauffer l'air comburant à une très-haute température et de l'amener sur des foyers à houille, ou tout autre combustible en nature, afin d'obtenir ainsi une plus haute température dans les fours de travail. Les régénérateurs (dont nous donnerons la description dans le second volume), au nombre de deux pour chaque four, recevaient alternativement les gaz brûlés, ou flammes perdues, sortant des fours de travail, pour s'échauffer et restituer à l'air de combustion qui les traversait ensuite, la chaleur qu'ils avaient accumulée.

Au moyen de registres, on faisait fonctionner alternativement chacun des régénérateurs ; cette interversion des courants de gaz brûlés et d'air à échauffer s'exécutait à peu près d'heure en heure. Cette disposition ne réussit, après divers essais infructueux, que quand les auteurs y appliquèrent les gaz, formés à part, par la combustion incomplète des combustibles au moyen de l'air atmosphérique. Leur gazogène est représenté figure 143.

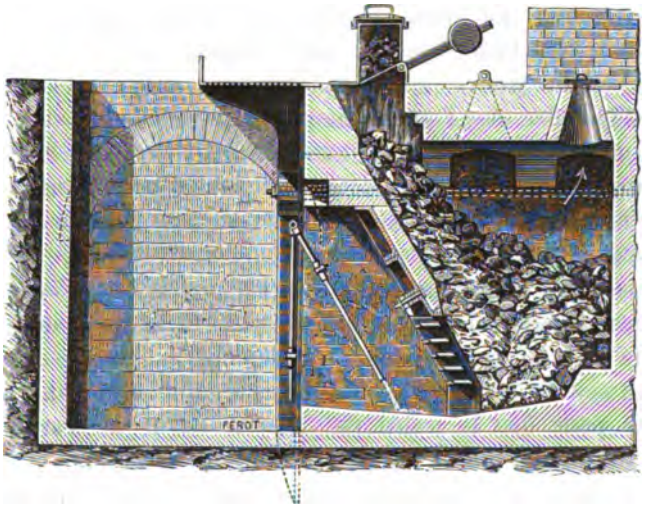


Fig. 143.

Il se compose d'une chambre en briques réfractaires voûtée ayant environ $2^m,40$ de hauteur et $2^m,15$ de largeur intérieurement ; la paroi

de face forme un plan incliné à 60°, et descendant jusqu'à 0m,90 du sol de la chambre, cette paroi se termine dans la même direction par une grille à gradins qui descend jusqu'au sol, lorsqu'on veut brûler du charbon demi-gras. Le combustible est chargé par une trémie supérieure munie d'une valve pour empêcher les pertes de gaz et les rentrées d'air ; les gaz s'échappent par un ouvreau placé dans l'angle de la voûte et présentant une section de 0m.50 sur 0m,50 ; d'autres ouvertures placées au sommet de la voûte permettent de fourgonner, et de briser la croûte de coke agglutiné qui peut se former à la surface du combustible et empêcher la libre circulation du gaz. Un tuyau placé en avant du fourneau permet de faire écouler de l'eau dans une espèce de cuvette formée par une double inclinaison du sol. Cette eau sert à rafraîchir la grille et les mâchefers qui occupent le fond du foyer, en même temps elle se transforme en partie en gaz, et amène un refroidissement des produits de la combustion.

Quand le combustible à brûler est du charbon gras, la grille à gradins ne se prolonge pas jusqu'au sol; elle vient jusqu'à une grille légèrement inclinée de l'avant à l'arrière et qui est placée à une certaine hauteur au-dessus du sol.

A une hauteur de 0m,50 à 0m,60 au-dessus du sol, ou de la grille horizontale, le mur de fond est ramené en avant, de façon à former un étranglement qui limite la zone de combustion, la rend régulière dans toute la section, et assure l'emploi complet de l'oxygène.

On s'est bien trouvé pour des charbons maigres et pour des menus d'insuffler de l'air au moyen d'un jet de vapeur en employant un « souffleur » de M. Siemens; dans ce cas, le cendrier est fermé à l'avant et l'air est insufflé dans le cendrier sous la grille qui est semblable à celle qu'on emploie pour les charbons demi-gras.

Pour le coke, le lignite, la tourbe, les gazomètres sont faits sur les mêmes modèles et ne varient que par l'inclinaison de la grille qui est de 45 à 60° suivant que le combustible est maigre ou collant. Quel que soit le combustible employé, il doit avoir une hauteur suffisante pour que la transformation en oxyde de carbone, de l'acide carbonique qui se forme d'abord, soit assurée.

Pour le bois, le gazogène est plus simple ; c'est une sorte de cubilot pyramidal à quatre pans; il n'y a pas de grille; l'air entre simplement au dessous de deux ou trois voûtes pratiquées à la partie inférieure.

847. Au sortir du gazogène, les gaz montent dans une cheminée

de 5 à 6 mètres de hauteur, puis suivent un parcours horizontal dans un conduit où les gaz qui étaient à 600° se refroidissent à 40°, puis ils arrivent dans une cheminée descendante; cette disposition assure le tirage dans le foyer et permet d'obtenir une certaine pression dans les régénérateurs; ceux-ci sont au nombre de quatre; deux servant à chauffer les gaz, deux servant à chauffer l'air, et employés alternativement; les régénérateurs, où se fait ce réchauffement, ont une certaine hauteur, sont placés en contre-bas du four, et l'on obtient ainsi une nouvelle colonne d'air chaud ascendante qui augmente le tirage et par suite la pression dans les appareils de combustion; nous avons indiqué plus haut la nécessité antérieurement démontrée d'une certaine pression pour la combustion des combustibles gazeux.

Les fours à gaz peuvent avoir une bien plus grande étendue que les fours à houille; pour desservir un four, il est utile d'avoir plusieurs gazogènes; ainsi à Saint-Gobain, le four à fondre le verre, qui a 8m,50 de longueur sur 3m,50 de large et 2 mètres de hauteur sous clef, est alimenté par cinq de ces gazogènes, dont un de rechange. Ils consomment chacun, par 24 heures, 1600 à 1700 kilog. de houille. On groupe ainsi un certain nombre de gazogènes, et on les charge alternativement de façon à obtenir quelque régularité dans la composition du gaz.

848. La conduite de ce gazogène demande du soin; si les grilles viennent à se découvrir partiellement, il entre de l'air en excès; si elles ne sont pas assez couvertes, il se forme de l'acide carbonique. Il est bon que le combustible ne contienne pas trop de cendres. A Saint-Gobain, le combustible se compose de trois quarts de charbons gras, tout venant d'Anzin, propre et riche en matières volatiles, et d'un quart de charbon maigre ou de coke. M. Krans donne, dans le mémoire cité plus haut, l'analyse des gaz du gazogène Siemens qui brûlait ces houilles; ils contiennent :

	En volume.	En poids.
Oxyde de carbone.....	24,2	25,888
Hydrogène.....	8,2	0,601
Hydrogène protocarboné...	2,2	1,332
Acide carbonique.....	4,2	7,035
Azote.....	61,2	65,124
	100,0	100,000

M. Krans cherche à calculer, d'après la composition des gaz,

celle de la houille qui les a fournis, et il arrive au résultat suivant :

Carbone.....	84,380
Hydrogène.....	6,168
Oxygène.....	6,898
Azote, etc.....	2,554
	100,000

Si l'on se reporte aux compositions connues des houilles d'Anzin, on trouve qu'elles ne contiennent pas plus de 4 p. 100 d'hydrogène ; or la composition théorique de M. Krans comporte 6,98 p. 100 d'hydrogène qui ont été fournis par de l'eau décomposée, ce qui répond à 27 p. 100 d'eau environ par rapport au poids du combustible supposé pur.

En supposant que les pertes par le rayonnement, les cendres, l'eau entraînée et simplement vaporisée, etc., s'élèvent à 30 p. 100 de la quantité totale de chaleur produite, la température calculée des gaz se réduit à 750° ; M. Siemens indique 600°, comme température du gaz à la sortie de son gazogène.

M. Boistel a communiqué en 1867, à la Société des ingénieurs civils, les moyennes suivantes pour la composition des gaz provenant des gazogènes Siemens :

Oxyde de carbone.....	21 1/2 à 24
Hydrogène.....	5,2 à 9,5
Hydrogène bicarboné.....	1,3 à 2,6
Acide carbonique.....	61,2 à 64

Ces analyses, faites évidemment dans des conditions de bonne marche, montrent l'irrégularité de la composition des gaz ; plusieurs fois d'ailleurs on a constaté dans le gaz la présence de l'oxygène, ce qui résulte de la façon dont le feu est conduit.

Ces compositions font ressortir un nouvel avantage que présente le gazogène à cuve et à tuyère ; les gaz, dans ce dernier, sont plus riches en éléments combustibles ; ils se distinguent surtout par l'absence presque complète de l'acide carbonique.

On signale comme inconvénients dans l'emploi des fours Siemens, outre l'encombrement et l'irrégularité de marche des gazogènes, la nécessité d'employer un excès d'air qui peut s'élever à 20 p. 100, pour brûler les gaz, la perte de gaz lors de la manœuvre des valves d'interversion des courants de gaz, le refroidissement des gaz que nécessitent le tirage et la pression dans les appareils, la condensation des hydrocarbures.

Malgré ces éléments désavantageux, l'appareil Siemens s'est répandu surtout dans les verreries, les fabriques de glaces, les industries céramiques ; il y a donné une économie de 40 p. 100 sur les alandiers à la houille ou au bois. Il a été adopté également pour les fours à fabriquer ou à fondre l'acier ; mais il ne s'est pas répandu dans les forges à laminoirs.

849. La transformation du combustible en gaz et le chauffage des gaz et de l'air de la combustion sont des procédés dont l'importance se trouve démontrée par le succès des fours Siemens dans un grand nombre d'industries ; mais nous pensons que par la substitution du gazomètre à cuve, qui augmente la régularité de production des gaz, assure la pression intérieure, et peut s'appliquer dans certains cas où la disposition du local ou la nature du sous-sol ne permettent pas l'emploi des fours Siemens dans leurs conditions actuelles, on pourrait encore accroître l'extension de l'utilisation de ces procédés.

850. Dans les appareils Ponsard, le gazogène ne diffère que par des détails insignifiants du gazogène Siemens, la conduite du feu est la même, et l'irrégularité de composition des gaz est peut-être plus grande, puisqu'il n'y a en général qu'un seul gazogène par four. Les gaz, au sortir du gazogène, arrivent directement dans le four de travail ; l'air de combustion est seul chauffé par la chaleur perdue du four, mais d'une façon continue et par conséquent sans interversion de courants, au moyen d'une espèce de calorifère en briques placé en contre-bas des fours, et assez élevé pour donner à l'air échauffé l'impulsion nécessaire. Nous reviendrons sur cette construction en parlant des générateurs.

Pour obtenir les gaz à une température plus élevée, on emploie quelquefois dans les appareils Ponsard un gazogène surchauffé ; ces gazogènes sont à cuve (*fig.* 144). Ils se chargent par une trémie placée au sommet de la voûte et qui occupe toute la largeur du four ; le combustible forme une espèce de mur que traverse l'air chaud amené d'un côté, et qui sort de l'autre après sa transformation en gaz.

851. *Appareil de M. Beaufumé.* — Cet appareil se compose d'une caisse carrée en tôle, à doubles parois entre-toisées dans le genre des boîtes à feu de locomotives et contenant de l'eau, comme celles-ci. La grille est placée à la partie inférieure et le combustible est chargé sur une épaisseur de $0^m,60$ à $0^m,70$. L'air lancé au-dessous de la grille par un ventilateur, qui est mis en mouvement par une petite machine à vapeur, produit d'abord de l'acide carbonique et de la

vapeur d'eau ; mais ces gaz doivent se transformer en oxyde de carbone et en hydrogène, en traversant le charbon incandescent ; un tuyau les amène au-dessous de la chaudière, où ils s'enflamment, après avoir été mélangés avec de l'air lancé aussi par le ventilateur. Cet appareil est donc un gazogène en tôle (840), entouré d'eau. Le chargement s'effectue au moyen de deux trémies à double valve, dis-

Fig. 144.

posées de manière qu'il ne puisse jamais y avoir communication directe entre le foyer et l'extérieur.

L'appareil de M. Beaufumé a été essayé à l'Exposition universelle de 1855. Sa marche a été signalée par de nombreux accidents et de fréquentes réparations. Il faut beaucoup de temps pour la mise en train, et jusqu'à ce que l'appareil soit arrivé à la température nécessaire, il se dégage une grande quantité de fumée. Dans cette disposition, qui constitue un gazogène laissant beaucoup à désirer, la grille est difficile à décrasser et l'on ne peut brûler que des combustibles choisis.

Foyers à charbon pulvérisé.

852. En octobre 1839, Corbin de Boissières faisait breveter l'idée d'employer le charbon réduit en poudre impalpable à la combustion ; ce charbon était insufflé, au moyen de tuyères, dans les haut-fourneaux ou dans les fours à réchauffer. L'hygrométricité du charbon fait que la poudre s'agglutine quand elle n'est pas parfaitement sèche, et les frais de pulvérisation ont rendu ces procédés inapplicables.

Vers 1856 M. Zeni, ingénieur en chef de la marine et directeur des forges de Guérigny, se faisait breveter pour l'emploi du charbon pulvérisé, qu'il projetait sur une grille déjà chargée de combustible. Son appareil était appelé par lui moulin-ventilateur.

On trouve dans la *Revue universelle*, tome XXII, la description d'un procédé analogue, dû à M. Resch, et employé par lui à un four de chauffage et d'étirage du fer et de l'acier.

Enfin, tout récemment, M. Crampton a employé la houille pulvérisée au chauffage d'un four à puddler rotatif. Nous empruntons au Résumé de la séance du 2 avril 1875 de la Société des ingénieurs civils, la description sommaire du procédé employé. Le charbon est broyé au moyen des meules ordinaires des moulins à farine, la poudre est amenée dans une trémie contenant un axe vertical muni de rayons et qui tourne pour faciliter la descente du charbon. La poudre est fournie au moyen d'une roue à palettes et à travers une ouverture placée au sommet d'un plan incliné à deux cylindres distributeurs, dont on fait changer l'écartement quand on veut changer le débit ; la roue à palettes envoie plus de charbon que les cylindres n'en doivent débiter, de sorte que le charbon, au sortir de la trémie, se place à la hauteur de l'ouverture de sortie de la trémie et ne la dépasse pas ; par ce moyen, la poudre de charbon présente toujours aux cylindres une même hauteur de charge.

Au sortir du distributeur, la poudre de charbon suit une trémie très-inclinée, aboutissant en haut et en avant d'un tuyau horizontal évasé en pavillon, dans lequel pénètre de quelques centimètres un tuyau de plus petit diamètre amenant l'air du ventilateur. L'air sortant de cette buse fait appel de l'air extérieur par l'espace annulaire qui le sépare du tube, et le courant ainsi produit entraîne le charbon mélangé d'air. Le tuyau portant l'air et le combustible, de rond qu'il est sur tout son parcours, devient plat à son extrémité, qui aboutit à une ouverture de même forme dans la paroi d'un premier compartiment ou *flue-piece ;* ce compartiment est en communication avec le four par une large ouverture ; il communique aussi avec la cheminée ; de sorte que l'air, chargé de charbon, lancé par une pression de 5 à 6 centimètres d'eau, traverse le *flue-piece*, arrive dans le four, pénètre jusqu'au fond et, revenant sur lui-même, se dégage par le *flue-piece* et la cheminée.

Pour commencer l'inflammation, on introduit dans le four une certaine quantité de bois qu'on allume, le feu étant bien pris, on donne le vent, sans charbon ; quand le four est au rouge, on mélange

à l'air une certaine quantité de charbon dont on augmente peu à peu la quantité au fur et à mesure que le four s'échauffe.

Il paraît qu'on peut ainsi obtenir la combustion avec la quantité d'air exclusivement nécessaire.

Nous n'avons pas à considérer le four Crampton au point de vue métallurgique. Aussi ne décrirons-nous pas l'opération du puddlage, nous dirons seulement que la consommation de ce four se serait abaissée à 500 kilog. de houille en farine par tonne de fer, tandis que dans le puddlage ordinaire elle est de 1000 à 1200 kilog. M. Crampton avait aussi fondu du fer et de l'acier au creuset dans des fourneaux alimentés par le charbon pulvérisé.

Au point de vue de la combustion proprement dite, il est nécessaire que le charbon soit en poudre impalpable pour qu'il soit complétement brûlé dans le temps de séjour que fait dans le four le courant d'air qui l'entraîne, le tourbillonnement qui résulte de la rencontre des deux courants est évidemment favorable à la combustion en ce qu'il maintient le charbon en suspension dans l'air et en empêche le dépôt ; il est essentiel que la combustion se fasse dans le four de travail lui-même, car cette méthode de brûler le charbon augmente considérablement la surface extérieure du combustible et par suite le rayonnement, dont une grande partie serait inutilisée, si la combustion avait lieu en dehors de la chambre de travail.

La grande difficulté dans ce procédé est d'obtenir la combustion complète du charbon. Il est nécessaire d'employer un combustible de choix, contenant peu de cendres ; la pratique seulement permettra de juger de la valeur de la méthode.

Foyers à goudron.

853. Les fabricants du gaz destiné à l'éclairage ont cherché, à une époque où le goudron n'avait que très-peu de valeur dans le commerce, à employer comme combustible celui qui se produit dans la distillation de la houille. On imagina d'abord de le verser sur du coke placé sur la grille ; mais une grande partie du goudron était volatilisée sans être brûlée ; et comme la température du foyer était très-élevée, la partie de la cornue qui se trouvait au-dessus de la grille était promptement altérée. On a alors employé les deux dispositions suivantes, qui toutes deux ont donné de bons résultats. Dans certaines usines, on a muré l'orifice du cendrier, on a enlevé la grille, et on a rempli le cendrier de coke, de manière qu'il s'élevât presque à la

hauteur de l'emplacement de la grille ; puis on a fait tomber le goudron en filet très-fin sur le coke. L'air nécessaire à la combustion pénètre par un orifice d'un décimètre carré au centre duquel passe le tuyau à goudron ; la veine d'air arrive dans le foyer en éprouvant peu de variations de section et de vitesse, et dans une direction perpendiculaire au plan de l'orifice. Par cette disposition, 100 kilog. de goudron produisent l'effet de 3 hectolitres combles de coke, pesant 120 kilog.

854. Dans d'autres usines, on a brûlé le goudron dans un petit vase de fonte de 10 à 15 centimètres de diamètre (*fig.* 145) ; le courant d'air s'introduisait, comme dans la première disposition, par une ouverture qui donne passage au tuyau à goudron. En réglant convenablement l'orifice d'entrée de l'air et sa position, on parvenait à brûler le goudron assez complétement, et l'effet produit était à peu près le même que dans l'appareil précédent. Il est probable que, dans ces deux dispositions, on ne brûlait la fumée qu'à la condition de faire passer sur le goudron un certain excès d'air, et qu'on aurait obtenu un effet utile beaucoup plus grand, si l'on était parvenu à diminuer cet excès.

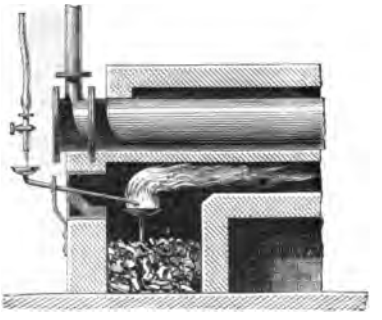


Fig. 145.

855. On avait proposé de brûler le goudron dans des appareils analogues aux becs de lampes, en maintenant le goudron à la même hauteur au moyen d'un réservoir à niveau constant ; mais les tubes, nécessairement très-étroits, auraient probablement été obstrués, et je doute que, sans un courant d'air forcé, on eût réussi.

Péclet pensait que le meilleur moyen de brûler le goudron consisterait à le faire arriver dans un godet en fonte traversé par un large tube vertical de même métal, fermé à la partie supérieure, communiquant par la partie inférieure avec une machine soufflante, et percé latéralement d'un grand nombre de petits orifices dirigés horizontalement. L'air, n'étant admis que par le tube, sortirait chaud et par des jets horizontaux qui, traversant la fumée, la brûleraient facilement et avec beaucoup moins de dépense d'air que par les procédés employés. L'appareil placé dans le foyer s'altérerait peu, à cause du courant d'air qui refroidirait constamment le métal ; d'ailleurs le prix

en serait si peu élevé, qu'un remplacement même assez fréquent serait sans inconvénient. Du reste, on pourrait peut-être supprimer la soufflerie en se servant du tirage d'une cheminée puissante, qui donnerait aux veines d'air une vitesse bien suffisante pour effectuer la combustion. On pourrait d'ailleurs régler l'orifice d'introduction de l'air extérieur.

856. Pour brûler le goudron, MM. Agnellet frères emploient une espèce de tuyère à double conduit, représentée figure 146 ; les deux tubes se raccordent à l'extrémité au moyen d'un bouchon fileté extérieurement et creux à l'intérieur ; le liquide arrive par le tube inté-

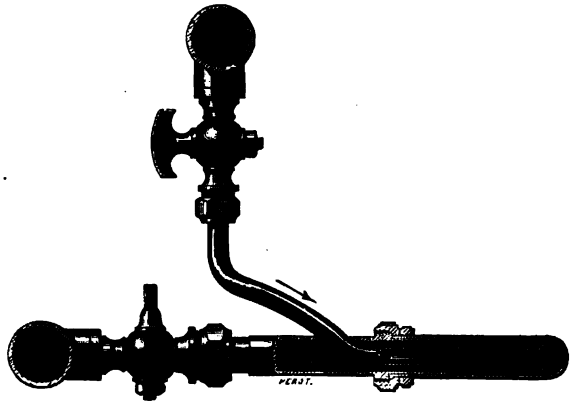


Fig. 116.

rieur et sort par des orifices pratiqués dans le bouchon ; un courant d'air comprimé entraîne le liquide en le pulvérisant ; c'est cet état considérable de division qui rend facile la combustion du goudron ; les introductions de liquide une fois réglées au moyen des robinets dont les deux tubes sont munis, on n'a plus à toucher à l'appareil ; l'air comprimé est fourni par une pompe ou une machine soufflante ; le liquide est placé dans un réservoir placé en surélévation par rapport aux appareils brûleurs.

Ces brûleurs ou tuyères sont introduits dans le foyer près des trous ménagés dans une plaque antérieure ; ces trous doivent être assez grands pour laisser entrer autour des tuyères l'air nécessaire à la combustion ; le tirage est obtenu au moyen d'une cheminée ordinaire.

Pour brûler l'huile lourde de houille et les huiles de pétrole plus fluides que les goudrons, on modifie légèrement l'appareil qui présente

la disposition représentée figure 147 ; le liquide est toujours amené par le tube intérieur, l'air par le tube extérieur ; mais ces deux tubes ne sont plus soudés à leur extrémité ; ils se terminent tous les deux par une partie hémisphérique percée d'une ouverture au milieu ; l'ouverture de l'air est la plus grande. Au moyen d'un raccord à vis, on peut allonger ou raccourcir le tube extérieur et régler l'action de

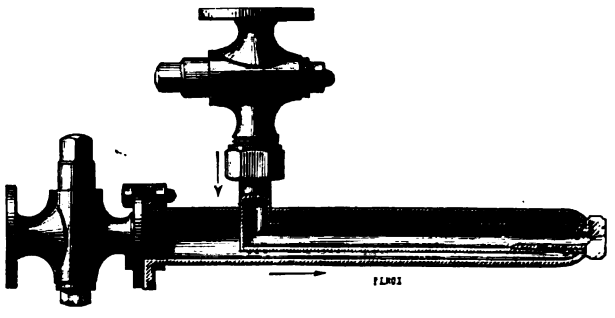


Fig. 147.

l'air de façon à obtenir la pulvérisation la plus parfaite. MM. Agnellet se servent régulièrement de leurs procédés au chauffage d'une chaudière à vapeur, d'étuves, etc., dans leur usine de la rue de Reuilly, à Paris.

857. M. Deville, dans les expériences dont nous avons parlé pour la détermination de la puissance calorifique des huiles de pétrole et des huiles de houille, se servait de l'appareil de M. Audouin; l'huile tombe en jets sur une sole en briques ; une plaque de terre percée d'ouvertures, ou une grille de fonte placée en avant, permet l'arrivée de l'air.

M. Deville s'est servi plus régulièrement d'un appareil qui consiste en une grille en fonte et d'un seul morceau qui forme l'avant du foyer ; cette grille est presque verticale, les barreaux sont creusés dans toute leur longueur sur la face placée à l'intérieur du foyer, de façon à former des rigoles dans lesquelles l'huile est distribuée pour être brûlée ; le distributeur est formé d'un tuyau horizontal muni d'autant de robinets qu'il y a de barreaux, un entonnoir placé sous chacun des robinets amène le liquide au moyen d'un tube incliné à chacune des rigoles pratiquées dans les barreaux de la grille. L'air nécessaire à la combustion pénètre entre les barreaux de la grille. Pour allumer, on place contre la grille une certaine quantité de braise enflammée et on ouvre le registre du foyer ; la grille

s'échauffe ; dès qu'elle est chauffée au rouge sombre, on ouvre l'un des robinets de distribution, et si l'huile s'enflamme, on les ouvre tous en réglant l'écoulement pour que la combustion soit complète. Comme les conduits qui amènent l'huile de houille peuvent s'engorger par le dépôt de naphtaline, il est important qu'on puisse les dégager facilement ; il est souvent nécessaire en hiver de chauffer l'huile dans le réservoir au moyen d'un petit serpentin à vapeur. Ce procédé a été employé et a rendu des services pendant l'investissement de Paris.

CHAPITRE III

Considérations générales sur les foyers.

858. Occupons-nous d'abord des foyers ordinaires, de ceux dont la grille est à peu près horizontale et dont les charges sont intermittentes. Les phénomènes qui s'y produisent sont très-compliqués, et pour le même appareil on peut brûler la même quantité d'un même combustible sur des surfaces de grilles très-différentes et avec des épaisseurs de combustible très-variables ; mais on produit aussi des effets utiles qui peuvent présenter de grandes différences.

Supposons, par exemple, que, pour une certaine grille et une certaine épaisseur de combustible, la moitié de l'air échappe sans altération ; si l'on augmente l'épaisseur de la couche de combustible, la résistance du foyer augmentera, une plus petite quantité d'air traversera le foyer, une plus petite quantité échappera à la combustion, la température des gaz et du foyer augmentera, et l'effet utile deviendra plus considérable. Au delà d'une certaine épaisseur de combustible, il se formera de l'oxyde de carbone ; la consommation de combustible pourra rester la même, mais l'effet utile ira en diminuant ; la consommation de combustible ne diminuera que quand le volume d'air appelé sera réduit au quart de ce qu'il était d'abord. Si, au contraire, on diminuait l'épaisseur du combustible, la résistance du foyer diminuerait aussi ; il passerait plus d'air, dans le même temps, à travers le combustible, une plus grande partie échapperait sans altération ; la consommation de combustible pourrait rester constante, mais l'effet utile diminuerait nécessairement. Des phénomènes tout à fait semblables se produiraient par la diminution ou l'accroissement de surface de la grille,

l'épaisseur de la couche de combustible restant constante. Ainsi, pour un même appareil, on peut faire varier la surface de la grille et l'épaisseur de la couche de combustible dans des limites très-étendues, sans changer notablement les quantités de combustible consommées, mais en produisant des effets utiles fort différents. Ajoutons à cela que l'influence de l'épaisseur de la couche de combustible varie avec sa nature et la grosseur des morceaux.

859. Il résulte évidemment de ce que nous venons de dire, que la condition importante à remplir consiste à employer une surface de la grille et une épaisseur du combustible telles que la totalité de l'oxygène de l'air soit transformée en acide carbonique. Cette transformation peut être réalisée, pour les combustibles qui brûlent sans flamme, comme le charbon de bois, le coke, les houilles sèches, les anthracites, pourvu que l'effet que doit produire le foyer soit constant et que sa température doive être élevée. On conçoit facilement que par des analyses d'air, ou seulement en observant les effets utiles produits, avec différentes épaisseurs de combustible, on puisse arriver à la détermination de l'épaisseur la plus convenable. On pourrait craindre cependant que, par suite de l'inégalité des morceaux de combustible, et des variations inévitables d'épaisseur de la couche, les chemins étant dans certains points plus longs, il ne s'y formât de l'oxyde de carbone, et que, d'un autre côté, les parties offrant une résistance moindre ne laissassent passer de l'oxygène libre. Cette transformation ne pourrait pas être réalisée, même approximativement, pour les combustibles qui brûlent avec flamme, parce que la combustion des gaz exige nécessairement que l'air qui a traversé la grille renferme encore une certaine quantité d'oxygène, et, comme le volume des gaz combustibles qui se dégagent est très-variable entre deux chargements, si le volume d'air était suffisant au commencement, plus tard il serait trop considérable, d'autant plus que, le foyer présentant une résistance décroissante à mesure que la combustion fait des progrès, le volume d'air qui le traverse augmente constamment dans l'intervalle de deux charges, comme le constatent les expériences de M. Combes (796) ; et c'est le contraire qui devrait avoir lieu.

860. On a cru longtemps que l'oxyde de carbone se formait très-facilement dans les foyers, par un petit accroissement de l'épaisseur de la couche de combustible ; mais des expériences positives ont changé les idées qu'on avait à cet égard.

Dans les fours à puddler, dans lesquels l'épaisseur de la couche

de houille varie de $0^m,20$ à $0^m,25$, et où la consommation par décimètre carré est d'environ $1^k,5$, les gaz qui s'échappent de la cheminée ne renferment que 0,07 à 0,08 d'air non altéré et une quantité très-faible de gaz combustible. Dans les fours à réchauffer où la porte est également fermée par un talus de houille qu'on pousse successivement sur la grille, qui est recouverte de $0^m,25$ de combustible, il ne se dégage pas sensiblement d'oxyde de carbone ; la quantité d'air qui échappe à la combustion varie de 4 à 8 pour 100 et la température du fourneau est d'environ 1800°. L'absence ou la très-faible quantité d'oxyde de carbone peut être reconnue à l'inspection de la flamme à son entrée dans la cheminée : elle n'a point la teinte bleue qui caractérise la combustion de ce gaz.

D'après un grand nombre d'expériences, MM. Laurens et Thomas avaient émis l'opinion que dans un foyer chargé de coke à l'épaisseur de $0^m,30$ à $0^m,50$, il ne se forme d'oxyde de carbone que par une combustion lente ; dans les foyers ordinaires, avec des épaisseurs de houille de $0^m,12$ à $0^m,25$, il ne s'en produisait pas, d'après ces ingénieurs.

861. MM. Foucou et Amigues ont fait, sur le chemin de fer de Paris à Chartres et sur une locomotive à marchandises, de nombreuses expériences au sujet de la composition de l'air brûlé, au repos et à différentes vitesses ; les gaz étaient pris dans un des tubes et recueillis dans des flacons au moyen d'un aspirateur.

Ces gaz, analysés sous la direction de M. Lucca, ont donné les résultats suivants :

		VITESSE A L'HEURE.		
	REPOS.	18 kil.	40 kil.	50 kil.
Acide carbonique.....	11,15	14,20	17,05	17,45
Oxyde de carbone.....	7,24	4,95	2,10	1,80
Hydrogène.....	1,35	0,15	0,05	0,40
Oxygène.....	4,20	4,45	1,95	2,70
Azote.....	74,00	76,40	78,80	77,65
Carbures d'hydrogène..	2,06	0,05	0,05	0,00

Aux vitesses moyennes des trains de marchandises, entre 20 et 25 kilomètres par heure, la proportion d'acide carbonique est à peu près de 15, et celle de l'oxyde de carbone varie de 4 à 5.

D'après ces expériences, la combustion est d'autant plus complète que la vitesse est plus grande ; mais, d'après M. Foucou, cette loi n'existe que jusqu'à la vitesse de 50 kilomètres ; pour des vitesses plus grandes, la proportion d'oxyde de carbone augmente ;

pour une vitesse de 55 kilomètres, la proportion d'acide carbonique descend à 16,50, et celle de l'oxyde de carbone remonte à 2,46.

M. Commines de Marsilly a fait aussi un certain nombre d'expériences sur la composition des gaz de la combustion (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1862, et *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1865). Voici les résultats qu'il a obtenus.

1° Combustion du coke dans une machine Engerth, marchant à la vitesse de 30 à 40 kilomètres à l'heure :

	CO^2	O	CO	Az
6 minutes après le départ.....	15,34	4,76	8,00	79,80
9 — —	11,76	2,94	»	85,30
10 — —	17,70	»	1,90	80,40
16 — — (vitesse de 40^{km}.	17,70	»	1,90	80,40
26 — — (chargement).	»	»	»	»
31 — —	13,09	2,98	»	83,93
34 — —	12,41	2,06	»	85,53
38 — —	12,76	1,60	»	85,64

2° Combustion de la houille dans une machine à marchandises du Creusot :

	CO^2	O	C^2H^4	CO	H	Az
1/2 min. après le départ.	14,20	»	2,80	»	2,50	83,00
4 — — .	13,10	»	2,22	4,46	5,02	75,20
9 — — .	11,25	»	1,00	8,25	4,65	74,85
16 — — .	13,70	»	1,14	4,70	0,86	79,60
20 — — .	17,04	»	»	1,40	»	81,56

3° Machine à marchandises n°.310 du chemin de fer du Nord, remorquant un train d'Amiens à Corbie ; on brûlait du gros charbon de Denain dont la composition est la suivante :

Hydrogène.....	5,16
Carbone.....	86,17
Oxygène et azote.....	6,10
Cendres.....	2,63

Ce charbon est gras, à longue flamme et donne beaucoup de fumée. Voici les résultats obtenus :

Durée écoulée depuis le chargement....	9′	12′	15′	18′	21′	24′	27′	30′	33′	39′
Acide carbonique	14,00	15,00	16,80	13,20	15,20	14,60	16,50	11,00	12,10	14,00
Oxygène	2,60	1,10	»	2,20	1,20	2,21	1,00	4,20	1,20	2,20
Azote	83,40	83,90	82,10	84,60	82,40	83,16	81,70	84,80	83,30	80,80
Oxyde de carbone et hydrogène	»	traces.	1,10	»	1,20	»	0,80	»	3,40	3,00
Air en excès	11,64	5,00	0,00	9,74	5,47	10,07	4,56	18,55	5,37	10,22

4° Chaudière fixe à deux bouilleurs de M. Fleury, teinturier à Amiens. On brûle un mélange par moitié des deux charbons suivants :

	H	C	O et Az.	Cendres.
Charbon de Hunwich	5,50	88,80	5,70	2,00
Charbon du Grand-Hornu	5,30	78,40	7,80	8,50

Voici la composition des gaz de la combustion :

Durée écoulée depuis le chargement....	0′	7′	12′	13′	18′	23′	26′1/2	30′	35′	40′
Acide carbonique	5,42	4,47	7,40	10,10	10,81	4,32	9,35	10,71	5,45	10,10
Oxygène	13,85	14,53	8,98	5,05	7,56	12,97	4,09	3,57	10,30	3,03
Gaz combustibles	»	»	»	»	»	»	1,54	»	»	»
Azote	80,73	81,00	83,62	84,85	81,63	82,71	85,02	85,72	84,25	86,02
Air en excès	64,47	67,43	40,33	22,38	34,80	59,00	18,75	15,62	45,95	23,23

Dans ces expériences on a ajouté quatre pelletées de charbon à trois reprises, à savoir 12′, 26′ et 38′ après le chargement.

Les trois premières séries d'expériences montrent que pour le coke aussi bien que pour la houille, lorsque la machine a pris sa vitesse et que, par conséquent, le tirage est devenu très-actif, il n'y a de gaz combustibles dans la fumée qu'en quantité très-faible, et que les gaz n'apparaissent pour la houille que quand la proportion d'air en excès est descendue au-dessous de 5 à 6 pour 100, et pour le coke quand il n'y a plus d'air en excès, et que probablement la quantité d'air est insuffisante et cela, quand l'épaisseur de la couche de combustible dépasse $0^{m},50$.

La dernière série d'expériences montre que dans le tirage faible produit par une cheminée ordinaire il y a de même peu de gaz com-

bustibles pour un excès moyen de 38,12 pour 100 d'air ; mais on a observé une grande quantité de fumée noire ; la combustion est donc encore incomplète, même avec l'excès d'air indiqué.

862. MM. Scheurer-Kestner et Meunier ont fait de nombreuses expériences sur la combustion de la houille. Nous extrayons de leur travail les nombres suivants qui donnent la composition du gaz de la combustion de la houille de Ronchamp.

AIR en excès. °/₀	COMPOSITION DES GAZ EN CENTIÈMES.						ÉLÉMENTS combustibles DES GAZ.		HOUILLE CONSOMMÉE PAR HEURE et par décimètre carré de grille.	TEMPÉRATURE MAXIMA DES GAZ à leur sortie.	QUANTITÉS DE HOUILLE. — CHARGE.	FRÉQUENCE DES CHARGES.
	Azote.	Acide carbonique.	Oxygène.	GAZ COMBUSTIBLES. Oxyde de carbone.	Vapeur de carbone.	Hydrogène.	Centièmes du carbone.	Centièmes de l'hydrogène				
									k	°	k	'
6,66	80,38	14,87	1,41	0,84	1,15	1,35	15,6	19,5	0,400	119	7	5
10,47	80,60	14,16	2,18	0,97	0,93	1,11	15,3	16,7	0,470	128	14	8
13,32	80,66	14,63	2,80	0,56	0,49	0,56	11,2	9,9(?)	0,470	126	7	4
17,61	81,52	13,43	3,77	?	0,46	0,91	6,1	17,5	0,400	135	7	3
20,94	80,23	13,43	4,42	0,24	0,32	1,41	5,7	26,9(?)	0,400	?	14	10
26,18	80,34	12,89	5,53	?	0,28	0,96	3,9	19,7	0,230	93,2	7	8
42,84	79,76	10,87	8,93	?	0,19	0,19	3,40	4,7	0,925	156	7	2
53,78	79,86	8,23	11,35	?	0,04	0,52	0,9	17,7	0.166	94	6	10
54,37	80,44	7,73	11,42	0,41	?	?	4,85	?	0,450	»	»	»

De ces expériences il résulte que pour un tirage faible, même avec un excès d'air qui dépasse 50 pour 100, on ne peut éviter la formation ni de l'oxyde de carbone, ni des hydrocarbures ; d'un autre côté, la quantité des gaz combustibles augmente quand la quantité d'air en excès diminue.

Pour un excès d'air de 6 à 10 pour 100, la quantité de carbone renfermée dans les gaz de la combustion est de 15 pour 100 environ et s'abaisse à 0,9 pour 100 quand l'excès d'air est de 54 pour 100 environ.

Il paraît aussi que la formation de l'oxyde de carbone dépend non-seulement de l'épaisseur du combustible et de l'activité de la

combûstion, mais encore de la grosseur des morceaux, de la température du foyer et de celle de l'enceinte du foyer.

863. Le charbon de bois, dans les mêmes circonstances, produit de l'oxyde de carbone beaucoup plus facilement que le coke, et c'est, sans aucun doute, pour cette raison que, pour fondre la même quantité de fonte dans les cubilots, il faut plus de charbon que de coke.

Avant de tirer aucune conséquence des faits que nous venons de rapporter, essayons de déterminer, au moins approximativement, la température des foyers.

864. *Température des foyers.* — Les conditions dans lesquelles la combustion peut se faire dans les foyers sont très-variables, et la température des produits de la combustion et du combustible placé dans le foyer peut être très-différente suivant la nature du foyer, la nature du combustible et même suivant la période de la combustion.

Dans le cas d'un combustible gazeux, intimement mélangé avec l'air de la combustion, les gaz brûlent sans dépôt de charbon dans la flamme, et le rayonnement est nécessairement faible; la température qui s'établit immédiatement dans la flamme est donc la température maxima que nous avons déterminée par le calcul (304 *bis*); ainsi le gaz d'éclairage brûlant sans excès d'air donnerait une température égale à 1400°, ou un peu supérieure.

Avec un combustible solide contenant peu ou point de matières volatiles, comme le charbon de bois, le coke, l'anthracite et les houilles maigres, le phénomène de la combustion est encore simple; la température obtenue est encore la température maxima calculée; cependant, comme nous l'avons indiqué (299), quand le foyer est en pleine activité, le combustible est déjà porté à une température élevée, lorsqu'il reçoit l'action de l'air froid, et il en résulte une surélévation de la température obtenue. C'est ainsi que le calcul indique pour le charbon pur une température de 1878° au lieu de 1758° qu'on obtiendrait seulement si on ne tenait pas compte de la cause que nous venons de signaler. Il ne faut pas oublier que le calcul suppose que le rayonnement est inférieur à la chaleur que peut restituer la combustion ultérieure des gaz dissociés. C'est ce qui arrivera généralement quand on fera brûler le combustible en masse épaisse, et que le foyer sera disposé de façon à diminuer le rayonnement autant que possible; c'est par exemple le cas de la forge dans l'expérience de M. Deville, celui des fours à puddler et à réchauffer le fer, des fourneaux à fondre l'acier, etc.

Dans le cas des combustibles solides contenant une grande quantité de matières volatiles, et en particulier de l'eau hygrométrique, la combustion n'est plus un fait simple, elle se divise en deux phases bien distinctes : la première est la période de distillation dans laquelle les produits gazeux brûlent seuls et dans laquelle la chaleur dégagée par ces produits est employée pour la plus grande part à produire la gazéification; dans cette période, la température est relativement basse et la dissociation presque nulle; la combustion est généralement incomplète par suite de la température peu élevée; mais dans cette période même la température va s'élevant peu à peu, jusqu'à ce que, le combustible étant carbonisé complétement, on arrive à obtenir la température maxima qui correspond au charbon pur. Encore ce que nous venons de dire ne s'applique-t-il qu'au cas où une certaine masse de combustible ayant été introduite dans le foyer, on la laisse se consumer jusqu'à la fin. Mais dans la pratique, il faut alimenter le foyer soit d'une façon continue, soit périodiquement.

Si l'alimentation est continue, comme dans les foyers à flamme renversée, la distillation et la combustion du combustible presque carbonisé se font en même temps, mais dans deux régions différentes de la masse du combustible; les produits de la volatilisation additionnés d'un excès d'air déjà échauffé viennent passer sur le combustible carbonisé et achèvent leur combustion ; dans cette dernière période, il se produit une dissociation des éléments de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique qui abaissera la température d'une façon très-considérable, cet abaissement pourra même être assez grand pour que le combustible, s'il est très-chargé d'eau, ne puisse plus brûler, quel que soit d'ailleurs le procédé qu'on emploie pour produire cette combustion.

Quand la température de combustion est ainsi notablement abaissée, on manque d'éléments pour calculer la température qui se produit. Les expériences de M. Bunzen ne fournissent pas d'exemple où la température de combustion se soit élevée à moins de 1146° pour l'oxyde de carbone, ni à moins de 2024° pour l'hydrogène; au-dessous de cette température, que se passe-t-il et que devient la dissociation? Il est probable que vers 900 ou 1000° cette dissociation est très-faible, et lorsque les calculs indiqueront pour température maxima une valeur notablement moindre que 900°, quand, de plus, la température qu'on obtiendra en ne tenant pas compte de la dissociation, mais en tenant compte du rayonnement et de la perte de

chaleur produite par l'échauffement et la fusion des cendres, la perte de charbon par la grille, etc., sera égale ou supérieure à 900°, c'est cette dernière température qui devra être adoptée comme température du gaz à la sortie du foyer.

Cette dernière considération est générale et s'appliquera dans tous les cas.

Si l'alimentation est discontinue dans le foyer, la température sera variable; après chaque charge, elle s'abaissera notablement pour s'élever ensuite progressivement jusqu'à ce que le combustible nouvellement chargé soit à son tour complétement carbonisé.

En résumé, pour calculer la température d'un foyer :

On calculera d'abord la température maxima en tenant compte des pertes par le rayonnement, etc.; si la température obtenue est inférieure à 900 ou 1000°, c'est celle qu'il faudra adopter.

Si la température obtenue par le calcul précédent amène à un résultat supérieur à 1100°, on fera le calcul à nouveau en faisant intervenir la dissociation; on emploiera pour cela les formules indiquées au livre I^er^; si la température obtenue est comprise entre 1146° et 2500°, ce sera la température cherchée.

Si la température trouvée était peu supérieure à 2500°, c'est encore cette dernière qu'il faudrait prendre, et si enfin on trouvait une température de 2800° ou au-dessus, il y aurait lieu de recommencer le calcul en supposant une dissociation plus considérable.

865. Nous avons vu que les températures calculées en tenant compte de la dissociation sont sensiblement inférieures à celles que fournit l'expérience, en ce qui concerne le charbon et le gaz d'éclairage. Cette différence est encore plus accusée lorsqu'il s'agit des combustibles gazeux contenant de l'acide carbonique comme les gaz des gazogènes ou ceux des hauts fourneaux. Si l'on considérait les chiffres obtenus comme exacts, on serait mené à cette conséquence bizarre et tout à fait contraire à l'expérience qu'une surchauffe initiale de 300° à 700°, suivant les cas, n'augmenterait pas sensiblement la température finale obtenue par la combustion de ces gaz.

C'est ainsi que, si l'on se reporte au tableau du premier livre (304 *bis*), on trouve, en tenant compte de la dissociation, une température de 441° pour la combustion des gaz des hauts fourneaux au charbon de bois; si les gaz étaient au préalable échauffés à

500°, ainsi que l'air de la combustion, il en résulterait une température finale de 941°; or, à l'aide de ces gaz employés dans les conditions que nous venons de dire, la température obtenue permettait de fondre la fonte blanche et de souder les balles dans les fours à puddler; c'était donc une température de 1100 à 1300° à laquelle on arrivait ainsi. Il y a donc lieu de supposer que dans le cas de la combustion directe des gaz en présence de l'air la dissociation de l'acide carbonique et celle de la vapeur sont moindres que celles qui résultent des expériences de M. Bunzen.

Par l'ensemble de cette discussion, il est suffisamment prouvé qu'il n'est point de moyen de calculer exactement *à priori* la température finale qu'on obtiendra de la combustion d'un combustible déterminé.

Quand on ne tient pas compte de la dissociation, on arrive à des nombres notablement trop forts, dans beaucoup de cas.

Quand on tient compte de la dissociation, les nombres obtenus en se basant sur les expériences de M. Bunzen sont notablement trop faibles, surtout quand il s'agit de combustibles gazeux, contenant déjà de l'acide carbonique.

La question ne pourrait être résolue que par des expériences directes dans lesquelles un combustible déterminé serait placé dans une capacité close en contact avec l'oxygène nécessaire à sa combustion, le milieu étant porté à des températures variables, et des excès de gaz inerte, de combustible et de vapeur d'eau étant successivement introduits avec les éléments de la combustion. Ces expériences, d'ailleurs fort délicates à exécuter, permettraient par la détermination directe de la température et de la pression du mélange intérieur d'en obtenir la composition, et par suite les véritables conditions de la dissociation de l'acide carbonique et de l'eau aux différentes températures, et dans les cas applicables à la combustion.

866. Pour obtenir une valeur approchée de la température du foyer et des gaz, admettons que le pouvoir rayonnant du charbon soit le même que celui des corps ternes, et désignons par R la quantité de chaleur émise par mètre carré et par heure ; nous aurons (701) :

$$R = ma^{t}(a^{\theta} - 1); \quad m = 124{,}72K; \quad K = 3{,}6; \quad \text{et} \quad a = 1{,}0077;$$

t étant l'excès de la température du foyer sur celle de l'enceinte, et θ

celle de l'enceinte. En supposant $\theta = 150°$, et en prenant successivement pour t

500°	600°	700°	800°	900°	1000°

on trouve pour R

19408	43371	95013	226190	445500	962100

et par décimètre carré

194	434	950	2262	4455	9621.... (*a*)

Ainsi les quantités de chaleur rayonnée croissent suivant une loi très-rapide avec la température; car elles varient à peu près dans le rapport de 48 à 1, pour des excès de température variant de 850 à 350, c'est-à-dire de 2,4 à 1.

Si la surface de la grille était telle que chaque décimètre carré correspondît à une consommation de 1 kilog. de houille par heure, et si la totalité de l'oxygène de l'air était employée, le poids de l'air serait à peu près de 11 kilog., et la température que prendrait cet air en traversant le foyer serait de 2700° sans tenir compte de la dissociation; mais le rayonnement abaissera la température du foyer et celle de l'air, et cet abaissement sera tel que la quantité de chaleur qui restera dans l'air, augmentée de celle qui est rayonnée, forme la puissance calorifique du combustible. Si l'on admet, ce qui doit peu s'éloigner de la réalité, que l'air prend la température de la surface du foyer, il sera facile d'obtenir par tâtonnement une valeur approchée de cette température. Dans le cas dont il s'agit, la température de la surface du combustible sera inférieure à 1000°, car, pour cette température, la quantité de chaleur rayonnée l'emporterait sur la quantité de chaleur produite; en supposant que la température du foyer soit de 900°, la chaleur rayonnée serait de 4455, et celle qui resterait dans l'air serait de $900.11 : 4 = 2475$, et la somme totale serait de 6930, inférieure à la puissance calorifique du combustible; ainsi la température du foyer sera supérieure à 900°; elle s'éloignerait peu de 910°, et la quantité de chaleur rayonnée serait presque double de celle qui est entraînée par l'air.

Si l'on suppose que, l'oxygène de l'air étant toujours absorbé en totalité, la grille ait une surface double, c'est-à-dire qu'on ne brûle que $0^k,5$ de houille par décimètre carré et par heure, le poids d'air

qui traversera la grille sera de $5^k,5$; et, en faisant la même supposition que précédemment, on trouve que la température commune du foyer et de l'air est à peu près de 832°; la chaleur entraînée par l'air sera de 1144 unités, et celle qui est rayonnée sera de 2970; par conséquent, la chaleur rayonnée serait égale à celle qui est entraînée par l'air chaud multipliée par 2,6.

Si on suppose, toujours dans les mêmes circonstances d'une absorption complète de l'oxygène de l'air, que l'on ne brûle que $0^k,1$ de houille par décimètre carré et par heure, le poids de l'air qui passerait par heure par décimètre de grille serait de $1^k,1$; la quantité de chaleur par décimètre carré et par heure, de 800; la température commune irait à peu près à 650°; les quantités de chaleur rayonnées et entraînées seraient de 622 et 178, quantités dont le rapport est égal à 3,49.

Ainsi, à mesure que la surface de la grille augmente, la température du foyer et celle de l'air s'abaissent, et la quantité totale de chaleur rayonnée va en croissant, ainsi que le rapport de cette quantité à celle qui est entraînée par l'air. Il n'en est pas ainsi quand une certaine partie d'air échappe à la combustion.

En admettant un appel d'air double de celui qui est nécessaire à la combustion, et une combustion de 1 kilogramme de houille par décimètre carré, le poids de l'air qui traverserait chaque décimètre carré de grille par heure serait de 22 kilogrammes; la quantité de chaleur produite sera de 8000; la température commune de l'air et du foyer, de 850°; la quantité de chaleur entraînée par l'air, de 4675; et celle qui est rayonnée, seulement de 3358. Le rapport du premier nombre au second est de 1,39.

En supposant, dans les mêmes circonstances, une consommation de $0^k,5$ par décimètre carré de grille, le poids de l'air qui traversera cette surface dans une heure sera de 11 kilogrammes; la quantité de chaleur produite, de 4000; la température commune de l'air et du foyer, de 770; la quantité de chaleur entraînée par le courant d'air sera à peu près de 2117, la quantité de chaleur rayonnée de 1800. Le rapport du premier nombre au second est de 1,17.

Enfin, en admettant dans les mêmes circonstances une consommation de $0^k,1$, le poids de l'air qui traversera la grille sera de $2^k,2$; la quantité de chaleur produite, de 800; et on trouve que la température commune de l'air et du foyer est de 610°; que les quantités de chaleur entraînées par l'air et rayonnées sont 335 et 465. Le rapport du premier nombre au second est 0,72.

Ainsi, en supposant qu'il entre dans le foyer un volume d'air double de celui qui est nécessaire, à mesure que la surface de la grille augmente, pour la même consommation de combustible, la température du foyer s'abaisse, la quantité de chaleur, entraînée par l'air, d'abord plus grande que celle qui est rayonnée, finit par être plus petite.

Nous avons supposé que la température de l'enceinte était de 150°; si elle était plus basse, la perte de chaleur par le rayonnement serait plus petite. Si cette température était plus élevée, le rayonnement deviendrait plus faible, et il serait nul si la température de l'enceinte était égale à celle du foyer.

867. Nous venons de supposer deux cas extrêmes : celui où l'enceinte ne perd point de chaleur et prend, par conséquent, la température du foyer, et celui où l'enceinte possède une température constante, très-basse relativement à celle du foyer. Supposons maintenant que le foyer soit disposé comme dans le premier cas, mais qu'il renferme des corps qui absorbent la chaleur et dont la température soit constante : c'est ce qui existe dans tous les foyers de générateurs à foyers extérieurs et dans tous les fourneaux destinés à chauffer des liquides. Il est évident, d'après ce qui précède, qu'une partie seulement de la chaleur rayonnante du combustible sera absorbée, et cette quantité dépendra de l'étendue de la surface du corps relativement à la surface du foyer, de la quantité de combustible brûlée par décimètre carré de surface de grille et de la température du corps; alors la température du foyer sera intermédiaire entre celles que nous avons trouvées dans les deux cas extrêmes précédemment considérés.

868. On voit, par tout ce que nous venons de dire, que dans les foyers intérieurs dont le tirage est produit par une cheminée, où l'on brûle à peu près 1 kilogramme de houille par décimètre carré, et où le volume d'air employé est égal à une ou deux fois celui qui est nécessaire à la combustion, la température dépasse peu 800°; dans les foyers extérieurs, où les bouilleurs et les chaudières ne forment qu'une partie de l'enceinte du foyer, la température est supérieure; mais d'après le meilleur rendement qu'on observe dans les foyers intérieurs, cet accroissement de température que présentent les foyers extérieurs ne paraît pas constituer un avantage en faveur de ces derniers; c'est qu'en effet dans ceux-ci une partie de la chaleur rayonnée est perdue, tandis qu'elle est directement absorbée dans le cas des foyers intérieurs.

869. Voici les résultats d'une expérience sur la température des foyers; elle a été faite en projetant rapidement un certain volume de houille, en grande partie transformée en coke, dans un poids connu d'eau dont on connaissait la température. Le foyer appartenait à un générateur à foyer extérieur et à bouilleur; le poids de l'eau était de 120 kilogrammes, sa température de 7°; le poids de la houille pesée après l'opération, lorsqu'elle avait été complétement privée d'eau par une dessiccation de dix heures à une température supérieure à 100°, était de 24 kilogrammes : la température de l'eau a été portée de 7 à 37°. La capacité calorifique du coke étant de 0,2, la température cherchée était donnée par l'équation

$$24 \,.\, 0{,}2(t - 37) = 120 \,.\, (37 - 7)\,; \quad \text{d'où} \quad t = 723.$$

Mais on ne peut rien déduire de rigoureusement exact de cette expérience, parce qu'on ne connaissait ni la quantité de houille brûlée par décimètre carré de grille et par heure, ni la quantité d'air en excès qui traversait le foyer. Elle tend cependant à confirmer les chiffres que nous avons trouvés par le calcul.

870. *Comparaison des grandes et des petites grilles.* — Les ingénieurs sont très-divisés sur les avantages et les inconvénients des grandes et des petites grilles, c'est-à-dire des foyers à combustion lente et des foyers à combustion vive. Un grand nombre de faits paraissent favorables aux grandes grilles. D'après M. Wicksteed, dans une chaudière cylindrique à foyer intérieur, où l'on brûlait $0^k,228$ de houille par décimètre carré de grille, on a obtenu $8^k,524$ de vapeur par kilogramme de houille. La consommation de combustible ayant été réduite à $0^k,127$ par décimètre carré de grille, la quantité de vapeur a été de $8^k,425$. Dans une chaudière en tombeau (système Watt et Boulton), en brûlant $0^k,531$ par décimètre carré de grille, on a obtenu $8^k,301$ de vapeur par kilogramme de houille. Dans les chaudières de Cornwall, qui sont renommées pour leur grand effet utile, les surfaces de grille sont telles que chaque décimètre carré brûle par heure de $0^k,15$ à $0^k,20$. Mais on ne peut rien conclure de ces expériences, parce qu'elles sont insuffisantes, et qu'elles ne sont pas accompagnées des renseignements nécessaires. Pour en déduire l'avantage des grandes grilles sur les petites, il aurait fallu des expériences comparatives qui n'ont pas été faites; en outre, les effets produits par la combustion de 1 kilogramme de houille sont trop forts, parce que la vapeur renferme toujours de l'eau entraînée mécaniquement, et qui peut varier dans des limites très-étendues, suivant la position de l'origine du tuyau d'écoulement

de la vapeur. Il aurait fallu connaître la quantité d'air qui échappait à la combustion, l'étendue de la surface de chauffe des chaudières et la température de l'air à la sortie des carneaux ; car on conçoit que, si ces surfaces étaient assez grandes pour que la fumée fût refroidie à une température peu supérieure à 100°, toutes les grilles qui seraient traversées par un même volume d'air, pour brûler un même poids de combustible, produiraient le même effet utile. Un autre élément, qu'il aurait été aussi important de connaître, c'est la nature de la houille, la grosseur des morceaux et son épaisseur sur la grille.

M. Cavé a fait un grand nombre d'expériences sur les effets produits par des foyers de différentes surfaces, alimentés par la même houille ; les quantités de houille brûlées par décimètre carré et par heure ont varié de $0^k,70$ à $0^k,24$. Les résultats obtenus ont été sensiblement les mêmes ; du moins les variations ont été de même ordre que celles qui ont été obtenues dans plusieurs expériences avec la même grille.

D'après les expériences de M. Burnat (*Bulletin de la société de Mulhouse*, 1863), il paraît bon d'avoir de petites grilles avec les chaudières sans réchauffeur ; avec les chaudières à réchauffeur, la surface de la grille devrait correspondre à une consommation de $0^k,500$ par décimètre carré de surface de grille.

D'après les observations de M. Scheurer-Kestner, l'effet utile va d'abord en augmentant quand la surface de la grille augmente, mais il y a un maximum qu'il ne faut pas dépasser, parce qu'en augmentant la surface de la grille, on augmente les dimensions du foyer et par suite la déperdition de la chaleur. Le maximum d'effet utile paraît correspondre, pour une chaudière à réchauffeur, à une consommation de $0^k,280$ par décimètre carré de surface de grille.

871. Essayons maintenant, par des considérations théoriques, de nous rendre compte de l'influence des grandes et des petites grilles. Il y a, dans l'influence de la grandeur des grilles, plusieurs effets à considérer : la répartition de la chaleur produite entre l'air et le rayonnement, les circonstances de la combustion, la plus ou moins grande facilité de l'alimentation, et enfin la résistance du foyer au mouvement de l'air.

Considérons deux grilles de dimensions très-différentes, sur lesquelles on brûle dans le même temps le même poids du même combustible, dans les mêmes circonstances, c'est-à-dire en employant le même volume d'air en excès. Si aucune partie d'oxygène n'échappait à la combustion, d'après ce que nous avons vu (868), la quantité de

chaleur rayonnée sur la chaudière irait en croissant avec la surface de la grille ; dans l'hypothèse d'une chaudière à 150°, pour des surfaces de grille brûlant 1^{k} ; 0^{k},5 ; 0^{k},1, les quantités de chaleur rayonnée seraient égales à 2 ; 2,6 ; 3,49, de celle qui est entraînée par l'air, et la température de l'air étant de 910°, 832°, 650°, pour la même étendue de surface de chauffe, l'effet utile sera évidemment d'autant plus grand que la grille aura une plus grande surface. Si l'on suppose que l'oxygène ne se soit absorbé qu'à moitié, pour les trois surfaces de grille que nous venons de considérer, les quantités de chaleur rayonnée, rapportées à celles qui sont entraînées par l'air, seraient 0,72 ; 0,85 ; 1,39 ; ainsi elles iraient encore en croissant avec la surface de la grille ; et comme les températures de l'air seraient 850°, 778°, 610°, il y aurait de l'avantage à employer de grandes grilles. Mais, comme en général les surfaces de chauffe ont de grandes dimensions, la température de l'air à l'extrémité du canal serait peu différente et l'accroissement d'effet utile peu considérable. Les grandes grilles sont avantageuses quand on n'emploie que la chaleur rayonnante, et surtout quand elles ne sont pas traversées par un excès d'air. Ces considérations n'expliquent point cependant le grand avantage, bien constaté en Cornwall, des grandes grilles ; il est probable que les soins tout particuliers apportés à la conduite du feu empêchent l'introduction d'un trop grand excès d'air.

Quant à l'influence de la grandeur de la grille sur les phénomènes qui accompagnent la combustion, elle est très-compliquée et varie avec la nature du combustible. Si le combustible est du coke ou une houille sèche non flambante ou de l'anthracite, l'état du combustible ne change pas, suivant les époques de la combustion ; on peut alors par tâtonnement déterminer l'épaisseur du combustible pour laquelle la totalité de l'oxygène de l'air est utilisée ; alors les grandes grilles à feux dormants deviennent avantageuses, et, pourvu que leurs dimensions absolues ne soient pas trop grandes, l'alimentation périodique des foyers ne présente point de difficultés. Mais si les houilles sont plus ou moins grasses, elles changent de nature dans le foyer à mesure que la combustion s'avance. Au commencement, elles donnent beaucoup de flamme, et cessent d'en produire quand elles sont transformées en coke ; alors, pour que la quantité d'air qui échappe à la combustion fût sensiblement constante, il faudrait que le volume d'air, qui traverse la grille, allât constamment en décroissant entre deux chargements. Toutefois, pour ces houilles, les grandes grilles sont encore avantageuses, parce que, à chaque char-

gement, une partie seulement de la surface du foyer est recouverte de combustible, il se dégage moins de fumée et la combustion est plus complète ; en d'autres termes, la grille est constamment couverte de coke, et, si l'épaisseur en est suffisante pour qu'il n'échappe qu'une petite quantité d'air à la combustion, les charges nouvelles, très-divisées à la surface du coke, ne dégagent qu'une faible quantité de gaz, qui est brûlée par l'excès d'air traversant le coke. C'est d'ailleurs ce qui résulte des expériences de M. Combes sur des grilles où l'on brûlait $1^k,23$ et $0^k,5$ de houille par décimètre carré et par heure.

Les combustions très-lentes, et par conséquent les grandes grilles, sont surtout avantageuses quand les consommations sont très-faibles ; les cendres s'accumulent à la surface et préservent du refroidissement le combustible qui se trouve au-dessous, et qui peut brûler avec une grande lenteur.

Les grandes grilles ont, en outre, l'avantage de diminuer la résistance que l'air éprouve à traverser le combustible ; elles sont indispensables quand le tirage est faible, soit à cause d'une trop petite section de la cheminée, soit parce que le refroidissement de l'air brûlé est trop grand.

872. Cependant des ingénieurs très-habiles, qui étaient partisans des grilles sur lesquelles on brûlait de $0^k,7$ à $0^k,8$ de houille par décimètre carré et par heure, reviennent aux petites grilles brûlant 1^k à $1^k,2$ de houille dans les mêmes circonstances. Ils aiment mieux laisser dégager de la fumée que de laisser passer trop d'air non altéré ; et cette dernière condition, qui peut être satisfaite en donnant à la couche de houille une épaisseur convenable, variable avec sa nature et la grosseur des morceaux, peut être plus facilement réalisée et maintenue avec de petites grilles qu'avec de grandes. On pourrait craindre qu'avec des grilles disposées comme nous venons de le dire, et portées à une haute température, les chaudières ne fussent plus promptement altérées par les grands foyers à une basse température ; mais dans les locomotives, où la température est bien plus élevée que dans les foyers ordinaires, les enveloppes des foyers ne s'altèrent qu'à la suite d'un assez long usage et malgré certaines causes qui sembleraient devoir accélérer l'altération du métal.

Les expériences de M. Scheurer-Kestner (*Bulletin de la Société de Mulhouse*, 1869) établissent que le maximum d'effet utile pour les foyers à tirage naturel, correspond à un excès d'air d'environ 33 pour 100.

M. Burnat trouve qu'une grille inclinée est plus avantageuse qu'une grille horizontale; il n'a pas observé de différence appréciable, suivant que la grille est inclinée vers l'avant ou vers l'arrière. Il a enfin trouvé qu'il y a une distance de la grille aux bouilleurs qui fournit un effet utile maximum; cette distance serait de $0^{m},55$ environ.

873. Dans les chaudières tubulaires de la marine, on brûle par tirage naturel de $0^{k},70$ à $1^{k},30$ de houille par décimètre carré de grille ; au moyen d'expériences nombreuses on a constaté qu'au moyen du tirage naturel, dans la chaudière mise à terre, où l'accès de l'air neuf est bien plus facile et complet qu'à bord, le rendement en vapeur atteint son maximum quand la consommation est de $0^{k},90$ à 1 kilogramme par heure et par décimètre carré de surface de grille.

Dans des expériences faites à terre, à Indret en 1870, on a appliqué le tirage forcé par jet de vapeur aux mêmes chaudières, la vapeur s'échappait dans l'air à la pression effective de 130 millim. de mercure. La consommation, qui par tirage naturel était de $0^{k},98$, a été élevée à $1^{k},56$ par un tirage forcé énergique. En même temps, on a reconnu que la production de vapeur par kilogramme de houille restait sensiblement la même pour tous les tirages, soit $8^{k},36$.

Dans les locomotives, le tirage est plus énergique que dans l'expérience précédente, et on brûle une quantité de houille notablement supérieure pour une même surface de grille.

Voici des résultats d'expériences faites au chemin de fer du Nord, en 1858, sur trois types différents de locomotives :

	LOCOMOTIVES		
	CRAMPTON.	DU CREUSOT.	ENGE TH.
1° Dépense moyenne de combustible par kilomètre parcouru en 1858, déterminée sur toutes les machines du même type	$7^{k},70$ coke.	$11^{k},70$ houille.	$14^{k},90$ houille.
2° Vitesse normale de la marche, temps d'arrêt déduits	70^{km}	30^{km}	30^{km}
3° Dépense de combustible par heure	539^{k}	351^{k}	447^{k}
4° Surface de grille	$1^{m2},45$	$1^{m2},43$	$1^{m2},944$
5° Combustible brûlé par décimètre carré de surface de grille, en marche	$3^{k},71$	$2^{k},45$	$2^{k},30$

874. On a constaté, par une longue pratique, que les matières étrangères qui se trouvent dans les combustibles et qui constituent

les cendres ont une très-grande influence sur les effets utiles que produisent ces combustibles. Cette influence ne consiste pas uniquement dans une réduction de la puissance calorifique proportionnelle à la quantité de matières étrangères ; elle est beaucoup plus grande : il y a, entre les effets produits par des cokes à 0,15 et 0,02 de cendres, des différences qui paraissent difficiles à expliquer. Pour le coke à 0,15 de cendres, la puissance calorifique serait 0,85. 8000 = 6800 ; et la température produite serait 2687°, au lieu de 2700 que donnerait le coke pur ; ainsi la différence des effets ne provient pas de la différence des températures produites par la combustion. Il me paraît très-probable que l'influence des cendres provient de ce qu'elles se déposent à la surface du combustible en couches plus ou moins poreuses, ou s'y vitrifient et empêchent le contact immédiat de l'air avec le combustible, et par suite qu'il passe à travers le foyer d'autant plus d'air sans altération que le combustible renferme plus de cendres.

Cette influence des cendres est beaucoup moins sensible dans les foyers à température moyenne que dans les foyers à haute température. Dans ces derniers, les cendres fondent inévitablement et absorbent ainsi de la chaleur ; et, en outre, l'effet utile de ces foyers augmente très-rapidement avec la température obtenue.

875. Il me reste maintenant à parler des différents foyers fumivores qui ont été proposés, et dont il a été question précédemment. D'abord, il paraît, d'après un grand nombre d'expériences, et surtout d'après celles de M. Combes (795), que la combustion de la fumée ne produit pas d'économie sensible, probablement parce que l'excès d'air qu'on est obligé d'introduire dans le foyer, pour effectuer la combustion, fait plus que compenser l'accroissement de chaleur produite. Quand on est obligé de brûler la fumée pour se conformer aux ordonnances de police, on peut hésiter entre un grand nombre d'appareils qui, presque tous, peuvent satisfaire à la condition dont il s'agit. Voici mon opinion sur le mérite de ces appareils.

876. Tous les anciens appareils dans lesquels l'alimentation du foyer a lieu d'une manière continue, ou par la rotation de la grille, ou par une injection continue de combustible (813, 814, 815), sont jugés depuis longtemps, car ils ont disparu des ateliers ; ils sont chers, compliqués, sujets à des réparations fréquentes, et doivent tous laisser passer beaucoup d'air sans altération. L'appareil à grille à mouvement longitudinal (817) paraît être dans les mêmes conditions,

et on ne peut pas douter que, dans le jeu nécessaire au mouvement de la grille sur les deux faces latérales, il ne passe beaucoup d'air qui échappe à la combustion, d'autant plus que cet air n'éprouve aucune résistance pour entrer dans le foyer. Répétons d'ailleurs que la régularité du chauffage de ces appareils est un inconvénient dans un grand nombre de circonstances.

877. Les appareils dans lesquels la fumée des foyers à houille passe sur des foyers à coke peuvent donner de bons résultats, lorsqu'ils sont bien dirigés.

878. La grille à gradins, dans laquelle le chauffeur pousse continuellement le combustible vers le foyer à coke, peut produire aussi de bons résultats; mais elle a l'inconvénient d'exiger un travail presque continu de la part du chauffeur. La grille à étages est d'un service plus sûr pour obtenir le même effet; mais il ne faut pas oublier que ces grilles exigent du chauffeur une attention et un soin qu'il est bien difficile d'obtenir.

879. Dans un grand nombre d'appareils, la combustion de la fumée a lieu par des injections d'air sur la flamme, et ces injections ont été faites d'un grand nombre de manières différentes. La disposition indiquée au n° 790 me paraît seule remplir les conditions nécessaires pour brûler complétement la fumée, en n'introduisant dans le foyer que peu d'air en excès. Nous avons indiqué, en parlant de ces dispositions, les inconvénients qu'elles peuvent présenter au point de vue de l'effet utile.

Les appareils dans lesquels les combustibles sont transformés en gaz ont reçu des applications importantes dans certaines industries. Pour des générateurs de vapeur et des chauffages à moyenne température, la question est encore à l'étude.

880. Les foyers dans lesquels la combustion a lieu par une injection d'air, au moyen d'un ventilateur, dans une chambre à feu fermée, permettraient évidemment de brûler la fumée, de régler le volume d'air de manière à transformer en acide carbonique presque la totalité de l'oxygène de l'air; enfin, dans certains cas exceptionnels, de refroidir presque complétement les gaz, et par suite d'obtenir un plus grand effet utile que par les autres dispositions. Mais une pratique prolongée serait nécessaire pour en apprécier les avantages.

881. Un chauffeur attentif et soigneux peut arriver à obtenir, par une conduite convenable du foyer, tous les effets que peuvent donner les appareils fumivores. Il obtiendra ceux qui résultent de l'em-

ploi des grilles à gradins ou à étages s'il a soin : 1° de placer à l'avance son charbon, celui de la charge qui suivra, sur la plaque de foyer ; 2° de repousser sur le fond de la grille le coke formé ; 3° de pousser sur le devant de la grille la charge déjà échauffée, et en partie distillée par son séjour sur la plaque de foyer. Les produits de la distillation du combustible neuf seront ainsi obligés de traverser toute l'étendue de la grille et se trouveront brûlés. Il procédera par charges fréquentes de façon à maintenir son foyer à une allure sensiblement constante et il obtiendra ainsi les avantages d'un chargement continu. M. Burnat constate que dans les concours de chauffeurs, ceux qui obtiennent les meilleurs résultats ne laissent pas s'écouler plus de 3 ou 4 minutes entre deux périodes de chargement et jettent sur un foyer consommant 100 kilogrammes de houille par heure, environ 5 kilogrammes de combustible à la fois, en plusieurs pelletées ; il ajoute que pour des charges variant de 6 à 10 kilogrammes de charbon, la différence de rendement est excessivement faible, si même elle est appréciable.

Les appareils dits fumivores ne doivent jamais être employés dans le but d'y trouver une économie de combustible, quant à leur nécessité ou à leur efficacité, nous ne pouvons mieux dire que ce que disait un rapport de M. Combes : « une bonne construction des fourneaux, des dimensions suffisantes des grilles, des carneaux et de la section intérieure de la cheminée, l'élévation de cette dernière qu'on peut rétrécir avec avantage à la partie supérieure, sont des conditions indispensables auxquelles il doit être satisfait dans tous les cas. » « Ces conditions suffiront en général avec les soins d'un bon chauffeur et moyennant l'emploi exclusif de houilles maigres ou demi-grasses. Leur absence rend au contraire la combustion impossible ou très-difficile même avec le concours des meilleurs appareils fumivores connus. »

L'influence d'un bon chauffeur sur le rendement est considérable. Au concours annuel des chauffeurs établi par la société de Mulhouse, on a constaté une différence de 13 pour 100 entre les chiffres extrêmes des rendements obtenus par les concurrents. Il est bon, à ce sujet, de se tenir sur la réserve, lorsqu'il s'agit de l'expérimentation de quelque nouveau système de foyer, et dont la supériorité apparente peut souvent ne tenir qu'à l'habileté du chauffeur qui le dirige.

882. Dans toutes les dispositions de foyer, sans exception, on ne peut parvenir que par tâtonnements à produire le meilleur effet utile, même en supposant que l'effet à produire soit constant, et que

la qualité du combustible ne change pas, ainsi que la grosseur moyenne des morceaux; ces tâtonnements se font en variant l'épaisseur de combustible et l'ouverture du registre ; mais le chauffeur n'a aucun guide, quand l'effet à produire n'est pas constamment le même. On n'aura réellement de bons foyers, que quand on possédera un instrument indiquant à chaque instant l'état de l'air brûlé. Si la consommation de combustible était constante, un thermomètre placé à l'extrémité de la chaudière, ou dans le canal qui conduit les gaz à la cheminée, pourrait servir de guide au chauffeur pour régler l'épaisseur du combustible et l'ouverture du registre, parce que le maximum de température indiqué par l'instrument correspondrait au maximum de température produite par la combustion. La température s'abaisserait par un accroissement d'air sans altération qui traverserait le combustible, et par la formation de l'oxyde de carbone. Mais si la consommation n'est pas constante, il y aurait pour chacune une température maximum différente, et qui serait évidemment d'autant plus basse que la consommation de combustible serait plus petite. Un manomètre à tube incliné qui communiquerait avec le tuyau d'écoulement de l'air brûlé et qui serait disposé comme je l'ai indiqué au n° 658, serait très-utile pour reconnaître les conditions dans lesquelles s'effectue la combustion, parce que la charge indiquée par l'instrument donnerait la vitesse d'écoulement, qu'on en déduirait le volume d'air employé pour brûler chaque kilogramme de combustible, et qu'on pourrait régler le registre de manière à s'approcher du volume d'air qui produit le maximum d'effet ; mais cela suppose encore que l'état du foyer est constant. On voit encore ici une nouvelle raison pour éviter les variations périodiques qui se produisent toujours dans les foyers ordinaires entre deux chargements.

883. Si l'appareil était disposé de manière à refroidir complétement et utilement l'air brûlé, ce qui peut avoir lieu dans quelques circonstances, l'air en excès introduit dans le foyer aurait peu d'importance et tous les soins devraient être portés sur la combustion la plus complète possible de la fumée.

CHAPITRE IV

Foyers pour les divers combustibles.

884. Après ces considérations générales sur les foyers, je vais indiquer les dispositions qui me paraissent les plus avantageuses pour les différentes espèces de combustibles, en restreignant mes observations aux foyers des générateurs, ou du moins à ceux qui ne se trouvent pas dans des conditions exceptionnelles, comme dans certaines opérations métallurgiques.

887. *Foyers à houilles plus ou moins grasses.* — Ces foyers sont toujours à grille horizontale ou légèrement inclinée, et alimentés par intermittence. Il n'y a rien d'absolu dans l'étendue de la surface de la grille relativement à la quantité de houille consommée ; mais on pourra se décider pour les grandes ou les petites grilles d'après ce que nous avons dit précédemment (870), suivant que le foyer sera ou ne sera pas environné d'un corps à une haute température ; et, dans le dernier cas, suivant qu'il sera plus ou moins important d'avoir une combustion très-active, et suivant la facilité plus ou moins grande du service d'après les dimensions de la grille.

Ces foyers, tels qu'on les dispose ordinairement, ont plusieurs graves inconvénients. Le premier consiste dans l'obstruction des orifices libres de la grille par l'agglomération des fragments de combustible résultant de la fusion pâteuse qu'il éprouve par la chaleur, circonstance qui oblige le chauffeur à remuer fréquemment la masse en combustion, ou par la porte ou par un crochet qu'il passe à travers les barreaux de la grille. Le second provient de la variation d'état du combustible dans l'intervalle de deux chargements consécutifs, pendant lequel il passe à l'état de coke, et oppose au passage de l'air une résistance décroissante à mesure que la combustion fait des progrès ; par suite, la quantité d'air qui échappe à la combustion augmente progressivement dans l'intervalle de deux chargements. Enfin il se dégage toujours beaucoup de fumée à l'instant du chargement et encore après pendant un certain temps, surtout quand, les houilles étant menues, on les mouille pour éviter qu'elles ne soient entraînées par le courant d'air.

Le premier et le dernier des inconvénients signalés disparaissent en grande partie quand les grilles ont une très-grande surface et qu'elles

sont chargées à des époques assez rapprochées, parce que la houille introduite ne recouvre qu'une partie de la surface de la grille. On obvie aussi en partie à ces deux inconvénients en ayant soin de ne mettre le combustible frais que sur l'avant de la grille et à chaque charge de pousser ce combustible vers l'arrière, ce qui est facile pour les grilles inclinées ; par cette disposition, la houille qui se trouve en avant se distille en grande partie, et les gaz dégagés, traversant la partie de la grille qui renferme de la houille déjà transformée en coke, se trouvent dans des conditions favorables à la combustion de la fumée.

Ces foyers pourraient recevoir une grande amélioration, en chargeant les grilles de manière que la totalité de l'air qui traverse le combustible fût absorbée, et en injectant, par le seul effet du tirage de la cheminée, de l'air extérieur sur les gaz qui s'échappent du foyer, de manière à bien mêler les veines de gaz et d'air.

La disposition suivante me paraît bien préférable à celles qui ont été proposées. La grille est environnée, au fond et latéralement, de tuyaux creux en fer, en fonte ou en terre réfractaire, d'une assez grande section ; ces trois tuyaux communiquent entre eux et viennent s'ouvrir de chaque côté de la porte, où les deux orifices sont fermés par un registre que le chauffeur peut ouvrir plus ou moins ; les trois tuyaux sont percés latéralement de fentes étroites et très-rapprochées, disposées de manière que les jets d'air soient inclinés à l'horizon à peu près de 45°. Les tuyaux ayant une grande section, les veines d'air qui s'échapperont des fentes auront à peu près la vitesse qui résulte du tirage ; elles se prolongeront à une grande distance, et, comme les unes sont perpendiculaires à la direction de la flamme et les autres dirigées en sens contraire, elles se mêleront intimement avec les gaz sortant du foyer ; en outre, comme les veines d'air seront à une température élevée, toutes les conditions se trouveront réunies pour obtenir une combustion complète. Les expériences que nous avons déjà citées sur l'influence des jets d'air au delà du foyer dans des circonstances beaucoup moins favorables permettent de présumer que cette disposition serait efficace. Mais il faudrait déterminer, par des expériences préalables, l'ouverture qu'il convient de donner aux orifices d'accès de l'air, ouverture qui devrait décroître dans l'intervalle de deux chargements. Il faudrait aussi que le canal eût une section suffisante et qu'il en fût de même de la somme des surfaces des orifices d'écoulement. La section des canaux devrait être assez grande, relativement à la somme des orifices d'écoule-

ment, pour que l'air extérieur n'y éprouvât que peu de résistance. Quant aux sections des orifices d'écoulement, il faut remarquer que, l'air n'ayant que peu de résistance à vaincre, la vitesse d'écoulement serait à peu près quatre ou cinq fois plus grande que celle de l'air dans le cendrier ; il suffirait, par conséquent, que la somme des surfaces des orifices fût égale à peu près à un dixième de la section de la cheminée. Mais l'épaisseur du combustible sur la grille devrait être assez grande pour que la totalité de l'oxygène de l'air fût transformée en acide carbonique, et une partie de celui-ci en oxyde de carbone. La grille et l'avant du foyer constitueraient ainsi un véritable gazogène dont les gaz seraient brûlés au voisinage de l'autel et dans les meilleures conditions.

886. On pourrait simplifier cette disposition en ne produisant d'injection qu'au fond du foyer. Derrière l'autel se trouverait un grand cylindre de fonte ou de terre réfractaire fermé par les deux bouts, communiquant par la partie inférieure avec le fond du cendrier au moyen d'une ouverture ayant la largeur de la grille et qui pourrait être fermée par un registre à la disposition du chauffeur. Il serait percé d'un grand nombre de fentes placées de manière à diriger obliquement des veines d'air dans le foyer.

On pourrait aussi supprimer le dégagement de fumée qui accompagne toujours l'ouverture de la porte, en employant le mode d'alimentation indiqué au n° 789 et en se servant d'une seconde grille sur laquelle on rejetterait le coke, ce qui faciliterait beaucoup l'enlèvement des résidus.

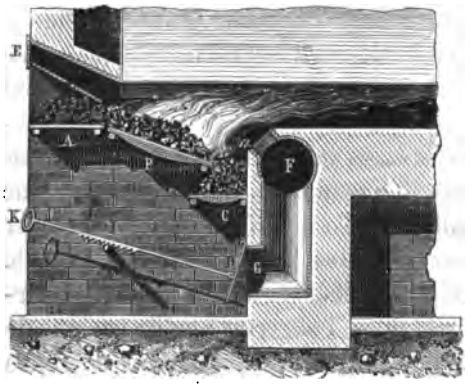


Fig. 148.

La figure 148 représente l'ensemble de ces dispositions. A, plaque de fonte sur laquelle le combustible est accumulé et d'où on le pousse sur la première grille ; E, fente étroite fermée par une vitre, qui permet au chauffeur de voir l'état du foyer ; P, première grille inclinée ; C, seconde grille sur laquelle s'accumulent le coke et les résidus ; F, tuyau en fonte ou en terre réfractaire fermé par les deux bouts, portant à sa partie supérieure un grand nombre de pe-

tites buses *a*, étroites horizontalement, et inclinées de manière que les jets d'air aient à peu près l'inclinaison de la flamme, mais en sens contraire; G, prise d'air double dans le cendrier; H, registre destiné à régler l'entrée de l'air dans le tuyau F, et qu'on dispose au moyen de la poignée K, et des crans I.

887. Je regarde comme très-probable que cette disposition constituerait un très-bon système fumivore, sans accès d'une trop grande quantité d'air inutile, si le feu était bien dirigé; et je pense que, si les différentes dispositions qui ont été employées pour introduire des jets d'air dans les foyers n'ont pas donné de bons résultats, cela tient à ce qu'ils étaient trop grands ou trop petits, qu'ils n'étaient pas assez divisés, et que l'air sortant n'avait pas été préalablement échauffé. J'ai sous les yeux un ouvrage anglais sur les foyers à houille, publié en 1854 par sir Williams, dans lequel se trouvent représentés tous les modes d'injection de l'air; dans tous, l'air est lancé dans le sens de l'air brûlé ou perpendiculairement, et dans un très-grand nombre l'air arrive de l'extérieur dans un espace fermé d'une grande hauteur, situé derrière la grille, d'où il s'écoule par des orifices percés dans une plaque de fonte verticale, plus ou moins inclinée ou horizontale. Il est évident que la division des jets n'a d'influence que dans cette dernière position de la plaque; car, dans toutes les autres, les jets ne restent séparés qu'à une petite distance de la plaque et sont réunis bien avant qu'ils aient atteint les gaz combustibles.

888. *Foyers à houilles sèches et à anthracite ne se délitant pas au feu.* — Les houilles sèches, c'est-à-dire celles qui ne produisent pas sensiblement de flamme, et les anthracites qui ne se délitent point par l'action de la chaleur, peuvent être brûlés dans les foyers ordinaires, de manière à produire un très-bon effet utile, parce que ces foyers sont toujours sensiblement dans le même état, mais à la condition que l'épaisseur du combustible et le tirage soient convenables. L'épaisseur du combustible doit être d'autant plus considérable, que les morceaux sont plus gros et que la surface de la grille est plus petite, afin que le foyer soit à une haute température et qu'il ne se dégage qu'un petit volume d'air sans altération. Une injection d'air pourrait être utile pour mêler les veines d'air brûlé, contenant, les unes de l'oxyde de carbone, les autres de l'oxygène libre; mais alors il faudrait que l'épaisseur du combustible fût encore plus grande. Quelques essais feraient facilement connaître l'épaisseur du combustible et la position du registre les plus convenables.

Il n'y a qu'un certain nombre d'années qu'on sait employer les

houilles sèches; avant, on faisait venir à Fresnes des houilles grasses d'Anzin pour alimenter les générateurs des machines d'extraction. C'est M. Evrard, ingénieur, ancien élève de l'École centrale, qui paraît avoir réussi le premier à employer les houilles sèches pour les générateurs. Il se servait d'une grille d'une grande surface, car la consommation de houille par heure et par décimètre carré était de $0^{k},4$; l'épaisseur de la couche de combustible était de $0^{m},20$, et la distance de la grille aux bouilleurs de $0^{m},50$. Je regarde comme très-probable que, quand ces houilles seront mieux appréciées et que l'on connaîtra mieux les dispositions les plus convenables des foyers dans lesquels elles doivent être brûlées, elles seront préférées aux houilles grasses dans un grand nombre de cas, parce que les foyers à houilles sèches sont plus faciles à diriger que ceux à houilles grasses, et que les houilles sèches peuvent produire un plus grand effet sous le même poids que les autres houilles. Les foyers à houilles sèches sont plus faciles à diriger, parce que, l'épaisseur de la couche de combustible étant considérable, une petite variation d'épaisseur est sans influence, tandis qu'elle est très-grande dans les foyers à houille produisant de la flamme. Malgré leur plus faible puissance calorifique, l'effet utile des houilles sèches peut être plus grand que celui des houilles flambantes, parce que, les premières produisant peu de gaz combustibles, on peut donner à la couche de combustible l'épaisseur convenable pour ne laisser échapper du foyer qu'une petite quantité d'air sans altération.

889. *Foyers à houilles sèches et à anthracite se délitant au feu.* — Ces combustibles peuvent être brûlés dans des foyers ordinaires, en employant quelques précautions pour le chargement de la grille, et surtout en se servant des barreaux minces et peu écartés. Il serait toutefois préférable de les brûler dans des foyers à alimentation continue du genre de ceux que nous avons décrits (816). Il faudrait déterminer la hauteur de l'extrémité du tuyau d'alimentation, de manière que la grille fût toujours couverte de combustible, et que la couche de moindre épaisseur fût convenablement déterminée. Mais ce mode de combustion exige que les combustibles ne laissent pas trop de résidus. En outre, il est probable que les veines d'air brûlé qui ont traversé des épaisseurs de combustibles très-différentes ne seront pas composées de la même manière; que celles qui ont traversé les couches les plus minces renfermeront de l'oxygène libre, tandis que d'autres pourront contenir de l'oxyde de carbone; il serait alors avantageux de mêler les veines par une introduction d'air

extérieur, en donnant à la couche de moindre épaisseur une épaisseur suffisante pour absorber la totalité de l'oxygène de l'air. Pour les grands foyers, il faudrait évidemment employer plusieurs gaînes d'alimentation.

890. *Foyers à bois et à tourbe.* — Ces combustibles produisent beaucoup de flamme et n'encrassent pas les grilles, car les résidus passent facilement à travers les barreaux. La meilleure disposition est celle qui est indiquée au n° 785 ; mais il serait avantageux de produire une injection d'air au delà de l'autel, comme je l'ai indiqué pour les houilles. La colonne de combustible qui surmonte la grille constitue en effet une sorte de gazogène, qui produit du gaz d'une façon permanente et régulière et non occasionnellement comme dans les autres foyers. Cette disposition est d'ailleurs applicable et a été appliquée à la houille. On conçoit que la hauteur de la trémie ou du canal en brique qui surmonte la grille peut avoir des valeurs diverses suivant les combustibles, et qu'on peut donner à cette trémie une forme différente de celle qui est indiquée dans le dessin.

Les foyers à flamme renversée sont très-faciles à diriger et produisent une combustion complète de la fumée, quand on brûle les combustibles sur grilles.

891. *Foyers à sciure de bois et à tannée*, etc. — Quand on brûle ces combustibles sur des grilles, celles-ci doivent être horizontales, à grande surface, afin que la vitesse de l'air y soit très-petite et qu'il y ait peu de combustible entraîné. Pour éviter que le combustible ne passe à travers les barreaux de la grille, on la recouvre d'une couche de 5 à 6 centimètres de houille sur laquelle on le jette. Il y a toujours beaucoup de cendres et de menus entraînés, d'autant plus que la grille est plus petite relativement à la consommation ; par suite les carneaux doivent être souvent nettoyés.

Comme nous l'avons vu, la tannée, après avoir été essorée, et la sciure de bois contiennent près de 50 p. 100 d'eau, il en résulte qu'elles sont difficiles à brûler, aussi se servait-on de la houille comme combustible auxiliaire, tout en employant des foyers ordinaires. Mais on a cherché a réaliser une combustion régulière et économique de ces combustibles au moyen de foyers spéciaux.

En 1856, M. Kraft, ingénieur civil à Strasbourg, ancien élève de l'École centrale, établit en Alsace un foyer spécial pour la sciure, la tannée, etc. Ce foyer se compose d'une cage en maçonnerie, à section rectangulaire peu élevée au-dessus d'une grille à barreaux très-serrés, il est pourvu d'un cendrier avec porte. La cage, qui est la

chambre de combustion, est surmontée d'un tronc de pyramide en maçonnerie dont les parois intérieures forment légèrement saillie sur celles de la chambre de combustion; cette seconde capacité, qui porte un couvercle, doit fonctionner comme trémie de chargement continu, car l'appareil est maintenu plein de sciure ou de tannée à brûler. L'air est introduit, sous l'influence du tirage d'une cheminée, par une série d'ouvertures disposées dans la paroi de la chambre de combustion, au niveau de la baie qui amène les gaz enflammés sous la chaudière. Tout cet appareil est appliqué contre la façade de la chaudière, et cette façade elle-même forme une des parois du foyer; on parvenait à chauffer aussi, sans le secours de la houille, des chaudières de 8 à 15 chevaux.

Dans un rapport fait à la Société industrielle de Mulhouse, en 1860, M. Burnat rappelle le foyer de M. Kraft, et cite ensuite une disposition analogue établie à Strasbourg par M. E. Müller, ancien élève de l'École centrale, pour chauffer à la sciure une chaudière à vapeur. Dans ce cas, la saillie de la capacité pyramidale supérieure sur les parois de la chambre de combustion est supprimée; mais deux prismes en poterie réfractaire, à section triangulaire, sont disposés en travers de la chambre et à $0^m,30$ au-dessus de la surface de la grille; ces prismes servent à diviser le combustible et à le répartir sous la grille. L'air afflue directement par la grille.

M. Burnat donne, dans son rapport, la préférence au foyer Kraft dans lequel, dit-il, le volume d'air introduit et la surface de combustion restent sensiblement constants.

Quant aux foyers employés en métallurgie, dans lesquels il est important d'obtenir la plus haute température possible, et, par conséquent, d'employer le plus faible excès d'air, la transformation préalable du combustible en gaz paraît être la condition la plus avantageuse.

LIVRE VI

ÉMISSION ET TRANSMISSION DE LA CHALEUR.

892. Nous avons examiné, dans les livres précédents, tout ce qui se rattache à la production de la chaleur par la combustion; cette chaleur, produite dans les foyers, passe quelquefois directement dans les corps qui doivent être échauffés, comme dans les fourneaux métallurgiques et dans les fours à briques, etc.; mais, dans un grand nombre de cas, elle doit être employée à chauffer de l'eau, de l'air ou d'autres corps, par transmission à travers des enveloppes de diverses natures. Ainsi, pour compléter les considérations générales qui doivent précéder l'examen détaillé des différents usages de la chaleur, il nous reste à parler de l'émission de la chaleur par les surfaces et de sa transmission à travers les corps.

CHAPITRE PREMIER

Émission de la chaleur par des surfaces maintenues à une température constante.

893. Le cas dont il est question est celui d'un tuyau chauffé intérieurement par la vapeur et exposé à l'air; celui d'un vase plein d'eau chaude, etc. La quantité de chaleur émise par une surface maintenue à une température constante et exposée à l'air, dépend de l'étendue de cette surface, de sa forme, de sa température et de celle de l'air; il est important d'en connaître la valeur en unités de chaleur, par unité de surface, pendant l'unité de temps, en fonction des éléments qui la font varier, du moins pour les cas qui se présentent ordinairement dans les applications.

Pour comprendre comment cette quantité de chaleur émise peut être déterminée, considérons un vase métallique plein d'eau chaude; les métaux étant fort bons conducteurs de la chaleur, la surface ex-

térieure du vase sera à la température de l'eau qu'il contient. Supposons que le poids de l'eau, augmenté de celui du vase multiplié par sa capacité calorifique, soit représenté par P en kilogrammes, que S soit sa surface en mètres carrés, et que l'air extérieur soit à 0°; représentons par θ le temps, estimé en secondes, qui s'écoule pendant que l'eau se refroidit, de T degrés à T — 1 degrés. La quantité d'unités de chaleur perdue pendant le temps θ est évidemment égale à P, et doit être sensiblement la même que celle qui serait sortie du vase pendant le même temps, si sa température eût été constante et égale à la moyenne de T et de T — 1, c'est-à-dire à T — $\frac{1}{2}$. D'après cela, la quantité de chaleur M que perdrait par heure et par mètre carré la surface du vase, si la température était maintenue à T — $\frac{1}{2}$, serait

$$M = \frac{P}{S} \cdot \frac{3600}{\theta} = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{P \cdot 3600}{S}.$$

Ainsi, en observant les temps θ, θ', θ'', etc., qui correspondent à des refroidissements successifs de 1°, on en déduira les quantités de chaleur qui seraient émises par mètre carré et par heure pour les excès correspondants de température. Il restera ensuite à chercher par tâtonnement la loi que suivent ces résultats en fonction des excès de température.

894. Lorsqu'un vase plein d'eau chaude se refroidit, on appelle vitesse du refroidissement le rapport entre une variation très-petite de température dt et le temps $d\theta$ pendant lequel elle s'effectue; ainsi, on a $v = \frac{dt}{d\theta}$; or, comme Pdt représente la quantité de chaleur émise pendant le temps $d\theta$, si par un moyen quelconque la température du vase restait constante, les quantités de chaleur émises pendant le même temps deviendraient aussi constantes, et celle qui serait émise dans l'unité de temps serait évidemment égale à $Pdt : d\theta$, ou à Pv. Ainsi, l'unité de temps étant la seconde, on aura aussi

$$M = v \cdot \frac{P \cdot 3600}{S}.$$

En faisant $v = 1 : \theta$, ce qui revient à supposer la vitesse constante pendant le refroidissement de 1°, on retombe sur la première valeur de M.

895. *Loi de Newton.* — Newton avait admis que la vitesse du re-

froidissement dans l'air était proportionnelle à l'excès de la température du corps sur celle de l'air, et il avait posé la formule

$$v = qt;$$

t étant l'excès de température et q un coefficient variable avec la nature du corps ; mais cette loi est inexacte : les vitesses varient beaucoup plus rapidement.

896. *Lois de Dulong et Petit.* — MM. Dulong et Petit ont fait de nombreuses expériences sur le refroidissement d'un thermomètre placé dans une enceinte fermée, remplie de différents gaz sous différentes pressions, et maintenue à une température constante par son immersion dans un bain. Ces habiles physiciens ont constaté les faits suivants :

1° Le refroidissement d'un corps résulte de son rayonnement et du contact du fluide environnant ;

2° La vitesse du refroidissement provenant du rayonnement est la même pour tous les corps, mais sa valeur absolue varie avec la nature des surfaces. Elle est représentée par la formule

$$v = ma^{\theta}\left(a^{t} - 1\right),$$

dans laquelle m représente un nombre qui dépend de la nature de la surface du corps, a le nombre 1,0077, θ la température de l'enceinte, et t l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte ;

3° La vitesse du refroidissement provenant du contact du fluide environnant est aussi la même pour tous les corps ; mais sa valeur absolue est indépendante de la nature de la surface ; elle ne dépend que de la forme du corps et de l'excès de sa température sur celle de l'enceinte. Cette vitesse pour l'air, sous la pression de 0,76, est représentée par la formule

$$v = nt^{1,233}$$

dans laquelle n est un nombre variable avec la forme et l'étendue de la surface du corps, et t l'excès de la température du corps sur celle de l'air environnant.

897. *Nouvelles expériences.* — En admettant que ces lois soient parfaitement exactes, les formules qui les représentent ne peuvent servir à rien tant que les coefficients m et n ne seront pas connus pour les différentes natures de surfaces et pour les différentes formes de corps. J'ajouterai que MM. Laprévotaye et Desains avaient trouvé,

dans certains cas, des résultats qui ne s'accordaient point avec les formules ci-dessus. J'ai donc cru devoir reprendre la question, mais en la réduisant à l'étude du refroidissement des corps dans l'air, sous la pression ordinaire et dans des enceintes ternes ; car le refroidissement d'un corps dans différents gaz, sous différentes pressions et dans des enceintes dorées ou argentées, est une question purement spéculative qui ne se rencontre jamais dans les applications.

898. Des expériences, qui avaient pour objet de trouver les valeurs absolues du refroidissement, ne pouvaient pas être faites sur de simples thermomètres ; j'ai employé des sphères en laiton mince, dont les diamètres étaient compris entre $0^m,05$ et $0^m,30$; plusieurs cylindres dont les diamètres ont varié de $0^m,03$ à $0^m,30$, et les hauteurs de $0^m,05$ à $0^m,50$; plusieurs vases rectangulaires de dimensions différentes ; tous ces vases ont été employés successivement nus et recouverts de diverses matières. L'eau qu'ils renfermaient était sans cesse agitée. Les températures étaient estimées au moyen de thermomètres très-sensibles. Les temps se mesuraient à l'aide d'un compteur de Bréguet à pointage. Les vases étaient placés dans

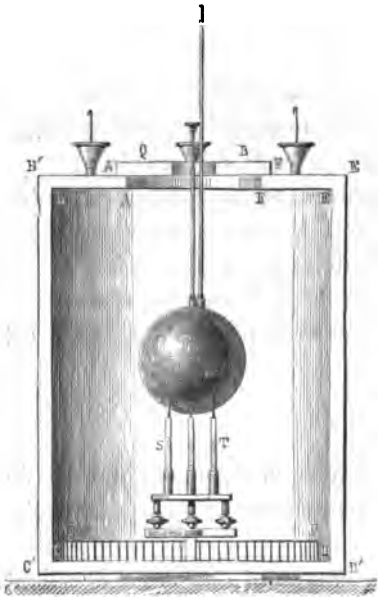


Fig. 149.

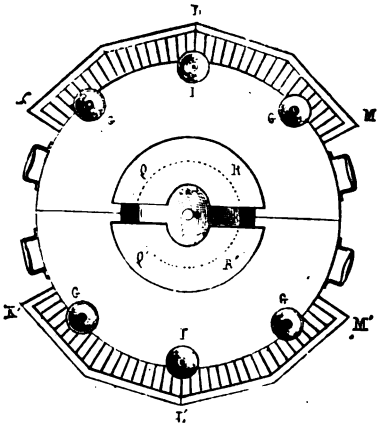


Fig. 150.

une enceinte ouverte à double paroi, dont l'intervalle était rempli d'eau, et l'air s'y renouvelait en prenant la température de l'enceinte.

899. Les figures 149 et 150 représentent, la première, une coupe verticale de la chambre à température constante; la seconde, une projection horizontale.

ABCDEF et A'B'C'D'E'F' sont deux cylindres en tôle plombée, concentriques, dont l'intervalle est rempli d'eau ; cette enveloppe est composée de deux parties égales, séparées par un plan vertical et qu'on maintient réunies par des crochets. Le cylindre intérieur a 1 mètre de hauteur et $0^m,80$ de diamètre ; l'intervalle qui sépare les deux enveloppes a $0^m,03$, et l'eau qu'il renferme est souvent agitée par des plaques horizontales annulaires, fixées à des tiges de fer verticales, qui sortent par les douilles G, G, G, G. Les températures de l'eau renfermée dans chaque moitié de l'enveloppe sont indiquées par des thermomètres placés dans les douilles I et I. KLM et K'L'M' sont deux canaux verticaux adossés à chacune des deux moitiés de la chambre ; ils sont ouverts en dessus et communiquent par le bas chacun avec une des ouvertures N, P (*fig.* 149) pratiquées à

Fig. 151.

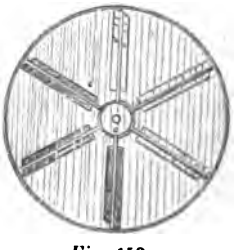


Fig. 152.

la partie inférieure de chacune des deux moitiés de l'enceinte ; ces canaux sont formés extérieurement par des planches de sapin, et renferment, dans toute leur hauteur, des plaques épaisses de tôle soudées perpendiculairement à la surface extérieure de l'enveloppe ; chacune a $0^m,10$ de hauteur ; une largeur égale à celle du canal et les plaques d'une même rangée horizontale sont placées au milieu des intervalles des plaques de la rangée qui précède et de celle qui suit ; des plaques semblables existent dans les ouvertures N et P. QR et

Q'R' sont deux demi-cylindres en fer-blanc fermés et pleins d'eau à la température ordinaire : ils servent à fermer plus ou moins l'orifice AF de la chambre. ST est un trépied à vis portant trois tubes de verre terminés par de petits bouchons de bois, dans lesquels pénètrent les extrémités des tiges de cuivre soudées à la partie inférieure du vase dont on veut observer le refroidissement.

900. Les figures 151 et 152 représentent une coupe verticale et une coupe horizontale d'un vase sphérique garni de son agitateur. Les plaques destinées à agiter l'eau sont soudées à six demi-cercles en fer, fixés par la partie inférieure à l'axe et dont les extrémités supérieures se terminent à un petit cercle horizontal dans l'intérieur duquel passe le petit cylindre à jour destiné à recevoir le thermomètre. Les vases cylindriques, d'un grand diamètre, sont disposés de la même manière (*fig.* 153 et 154). Lorsque les cylindres n'ont

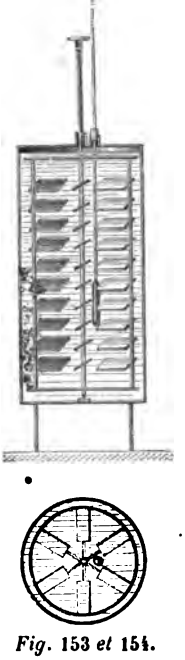


Fig. 153 *et* 154.

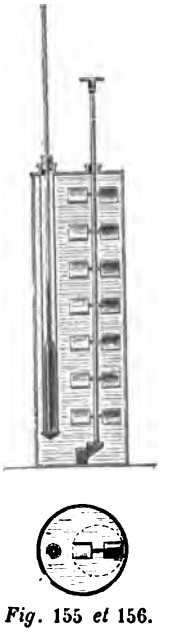


Fig. 155 *et* 156.

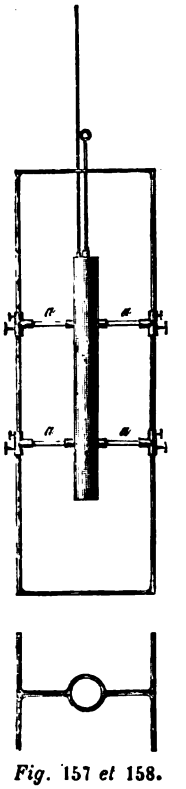


Fig. 157 *et* 158.

qu'un petit diamètre, l'agitateur est placé à côté du cylindre à jour qui renferme le réservoir du thermomètre (*fig.* 155 et 156).

901. J'ai représenté dans les figures 157, 158, 159, 160, 161 différentes dispositions qui ont été employées pour fixer, dans un cadre placé dans l'enceinte, des cylindres verticaux et horizontaux. Ces dispositions avaient pour objet de rendre les cylindres parfaitement immobiles, malgré les mouvements de l'agitateur. Les cadres sont en fer ou en laiton ; les tiges a, a, a.... sont très-minces et en bois de sapin : elles pénètrent dans de très-petits appendices métalliques soudés aux vases. Pour les cylindres placés horizontalement, la tige de l'agitateur tournait dans un bouchon qui fermait la tubulure ; il y avait un peu de jeu entre la tige et le bouchon, mais l'eau ne sortait pas à cause de la dilatation qu'éprouvait la petite quantité d'air restée dans le vase, dilatation due à la contraction de l'eau par le refroidissement.

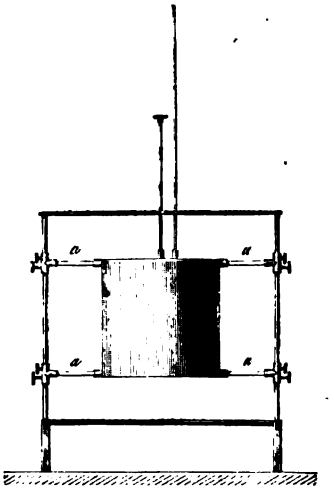


Fig. 159.

La figure 162 est une coupe d'un vase cylindrique terminé par deux demi-sphères et renfermant deux agitateurs.

Lorsque les vases devaient être longs et étroits, j'employais des cylindres de fer étirés, remplis de mercure ; l'agitateur du liquide

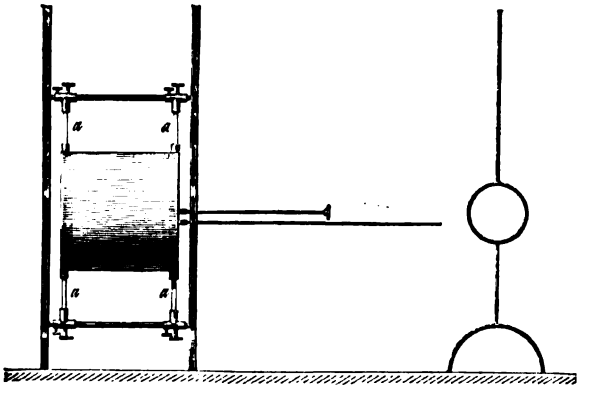


Fig. 160.

Fig. 161.

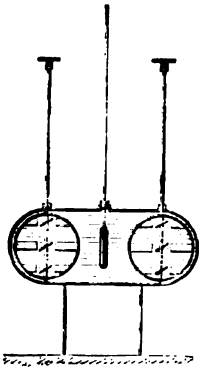


Fig. 162.

n'était plus nécessaire, et un thermomètre à long réservoir introduit dans le vase, en donnait exactement la température.

902. La figure 165 représente le petit appareil employé pour lire sur les échelles des thermomètres. Il se compose d'une petite plaque *ab*, recouverte de papier blanc; *c* et *d* sont deux douilles à travers lesquelles passe la tige du thermomètre ; chacune renferme un petit anneau de liége que l'on comprime plus ou moins à l'aide d'une vis de pression ; au milieu de la plaque *ab* se trouvent deux petites tiges parallèles entre elles et perpendiculaires à la direction de la plaque, sur lesquelles sont fixés, par des têtes de vis, deux fils métalliques très-fins, ou deux cheveux ; ces fils déterminent un plan perpendiculaire à la tige du thermomètre et dans lequel l'œil doit être placé pour observer. Cette disposition était nécessaire à cause du mouvement que le thermomètre éprouve par suite de la rotation de l'agitateur, mouvement qui ne permettait pas de se servir d'un cathétomètre.

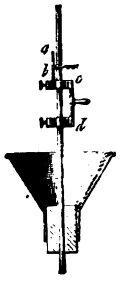


Fig. 163.

903. On voit dans la figure 164 l'appareil employé pour remplir les vases à certaines époques de leur refroidissement, condition indispensable pour que la surface de refroidissement reste constante. La condition à laquelle il fallait satisfaire est celle-ci : remplir d'eau un vase opaque, dont le niveau est descendu, sans sortir le vase de l'enceinte à température constante et sans faire déverser le liquide. L'appareil se compose d'un tube de verre AB ouvert par les deux bouts et garni d'une boule C ; à côté se trouve un autre tube de verre DEF, recourbé, également ouvert par les deux bouts ; les extrémités B et D sont à la même hauteur ; les deux tubes sont fixés, par leurs extrémités inférieures, dans un bouchon qui entre facilement dans une tubulure du vase ; le bouchon porte, à sa partie supérieure, une petite plaque de laiton d'un diamètre plus grand que celui de la tubulure, ce qui permet d'enfoncer toujours le bouchon de la même quantité ; lorsque le bouchon est en place, le point B est à la hauteur que le liquide doit atteindre. Pour remplir le vase, on enlève le bouchon mobile qui forme la tubulure, et on le remplace par le bouchon qui porte les tubes : la boule C étant pleine d'eau et l'extrémité A étant fermée avec le doigt, lorsque l'appareil est en place, on ouvre l'extrémité A et on aspire par l'extrémité F ; il est évident que le niveau du liquide dans

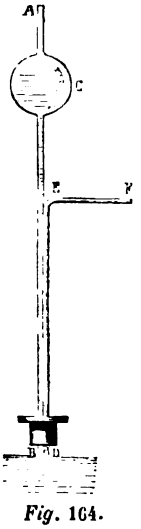


Fig. 164.

le vase aura atteint les extrémités inférieures des tubes, quand on aspirera de l'eau par le tube DEF ; à cet instant, on ferme l'extrémité A, on enlève l'appareil et on remet le bouchon ordinaire dans la tubulure.

904. Voici maintenant de quelle manière on opérait. Le vase étant rempli d'eau chaude et placé sur son support, on fermait l'enceinte ; on réglait l'ouverture de dégagement de l'air, de manière que sa surface fût à peu près égale à la section horizontale du vase ; l'agitateur de ce dernier était tourné d'une manière continue et ceux de l'enceinte étaient mis de temps en temps en mouvement. On observait le temps que le thermomètre employait pour s'abaisser d'un petit nombre de divisions, à différentes époques. Les températures indiquées par le thermomètre étaient ramenées à ce qu'elles auraient été, si toute la tige avait été plongée dans l'eau, en admettant, ce qui a été constaté par l'expérience et par le calcul, que la tige était exactement à la température de l'air environnant. On déduisait facilement de ces expériences la vitesse du refroidissement cherchée.

905. Après avoir obtenu la valeur de v, et par suite (894) les valeurs de M, pour des excès de température compris entre 25° et 65°, j'ai cherché à les lier par une formule simple, et j'ai trouvé qu'elles satisfaisaient à la suivante :

$$M = at(1 + bt).$$

Cette formule s'accorde parfaitement avec celles de Dulong et Petit dans les limites de température que nous venons d'indiquer, et il en résulte que ces dernières formules sont très-probablement exactes jusqu'à un excès de température de 260°, comme ces deux célèbres physiciens l'ont indiqué.

Le refroidissement résultant à la fois du rayonnement et du contact de l'air, il était nécessaire, pour déterminer les coefficients de la formule, de séparer les effets produits par ces deux causes ; j'ai employé pour cela la méthode suivante.

Supposons que M représente la quantité de chaleur perdue par un vase recouvert de noir de fumée, M′ celle qui est perdue par le même vase avec une surface brillante ; désignons par A la quantité de chaleur perdue par le contact de l'air et qui est la même pour les deux surfaces ; par R et R′ les quantités de chaleur perdues par le rayonnement du noir de fumée et du métal ; on a

$$M = A + R; \quad M' = A + R'; \quad \text{et par suite} \quad M - M' = R - R'.$$

Supposons maintenant que $R = c\,R'$; la dernière équation deviendra

$$M - M' = R'(c - 1); \quad \text{d'où} \quad R' = \frac{(M - M')}{c - 1};$$

et comme, $M = at\,(1 + bt)$, et $M' = a't\,(1 + b't)$, la valeur de R' sera

$$R' = \frac{a - a'}{c - 1}\,t + \frac{ab - a'b'}{c - 1}\,t^2.$$

Ayant ainsi l'expression générale de la valeur de R', celle de A s'en déduisait facilement, car on a $A = M' - R'$.

Pour obtenir les rapports c des rayonnements, voici la méthode dont je me suis servi ; elle repose sur une des lois de Petit et Dulong. Deux vases métalliques terminés d'un côté par une face plane, verticale, nue ou couverte de différentes matières, sont placés en regard, de manière que leurs surfaces planes soient parallèles et à des distances égales d'une pile thermo-électrique, en communication avec un rhéomètre très-sensible. L'une des surfaces est maintenue à une température constante, et on fait varier la température de l'autre jusqu'à ce que les effets produits sur les deux faces de la pile soient les mêmes, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'aiguille du rhéomètre revienne au zéro. En désignant par m et m' les pouvoirs rayonnants des deux surfaces, par t et t' les excès de leurs températures sur celle θ de la pile, on a, d'après Petit et Dulong, pour les quantités de chaleur rayonnées, $ma^{\theta}\,(a^t - 1)$, et $m'a\,(a^{t'} - 1)$, et comme ces quantités sont égales, on en déduit

$$c = \frac{R}{R'} = \frac{m}{m'} = \frac{a^{t'} - 1}{a^t - 1}.$$

Il résulte de toutes ces expériences les formules suivantes :

906. La quantité de chaleur émise par rayonnement dans une enceinte dont la température diffère peu de 12° et pour des excès de température compris entre 25° et 65° est donnée par la formule

$$R = Kt\,(1 + 0{,}0056t) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (a)$$

K est un coefficient qui dépend de la nature de la surface ; t est l'excès de température.

907. La quantité de chaleur perdue par le contact de l'air dans les mêmes circonstances est donnée par la formule

$$A = K't\,(1 + 0{,}0075t) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (b)$$

K′ est un coefficient qui dépend de la forme et des dimensions du corps ; t est l'excès de température.

908. Quand l'excès de température est faible, on peut négliger les termes du second degré, et on a pour la quantité totale de chaleur émise

$$M = R + A = (K + K')\,t = Qt$$

c'est-à-dire la loi de Newton.

Les formules (a) et (b) n'ont été déterminées que pour des excès de température compris entre 25° et 65° ; pour des excès de température plus considérables, il faudra se servir des formules de Petit et Dulong. Nous allons, en conséquence, énoncer ces formules d'une manière générale et donner les valeurs des coefficients K et K′, pour les différentes surfaces et les différents corps, d'après les résultats de nos expériences.

Formules générales relatives à l'émission de la chaleur dans l'air.

909. La quantité de chaleur émise par une surface maintenue à une température constante, dépend du rayonnement et du contact de l'air ; de sorte que, si on désigne par M la quantité totale de chaleur émise pendant un certain temps, par R et A, celles qui proviennent du rayonnement et du contact de l'air, on a

$$M = R + A \qquad (1)$$

910. *Chaleur émise par rayonnement.* — La quantité de chaleur émise par rayonnement, par unité de surface et par unité de temps, est indépendante de la forme et de la grandeur du corps, pourvu que sa surface n'ait pas de parties rentrantes ; elle ne dépend que de la nature de la surface, de l'excès de sa température sur celle de l'enceinte et de la valeur absolue de cette dernière.

911. Lorsqu'un corps est placé dans une enceinte à surface terne, ce qui a presque toujours lieu, excepté dans des recherches de laboratoire, la quantité R de chaleur émise par rayonnement, par mètre carré et par heure, est donnée par la formule

$$R = 124{,}72 \cdot K a^{\theta}\left(a^{t} - 1\right) \qquad (2)$$

dans laquelle θ représente la température de l'enceinte, t l'excès de la température de la surface sur celle de l'enceinte, a un nombre constant égal à 1,0077, et K un nombre qui dépend de la nature de la surface.

VALEURS DE K POUR DIFFÉRENTES MATIÈRES.

Argent poli	0,13	Zinc	0,24
Papier argenté	0,42	Étain	0,215
Laiton poli	0,258	Tôle polie	0,45
Papier doré	0,23	— plombée	0,65
Cuivre rouge	0,16	— ordinaire	2,77
Tôle oxydée	3,36	Noir de fumée	4,01
Fonte neuve	3,17	Pierre à bâtir	3,60
— oxydée	3,36	Plâtre	3,60
Verre	2,91	Bois	3,60
Craie en poudre	3,32	Étoffes de laine	3,68
Poussière de bois	3,53	Calicot	3,65
Charbon en poudre	3,42	Étoffes de soie	3,71
Sable fin	3,62	Eau	5,31
Peinture à l'huile	3,71	Huile	7,24
Papier	3,77		

912. Pour le papier et les étoffes, la couleur est sans influence. On voit, d'après ce tableau, que les matières pulvérulentes ont des

EXCÈS de TEMPÉRATURE.	VALEURS DE R.	EXCÈS de TEMPÉRATURE.	VALEURS DE R.
10°	11,2 . K 1,14 . K(t − θ)	130°	239,3 . K 1,87 . K(t − θ)
20	23,2 . K 1,18 . K(t − θ)	140	259,5 . K 1,97 . K(t − θ)
30	36,1 . K 1,22 . K(t − θ)	150	302,1 . K 2,06 . K(t − θ)
40	50,1 . K 1,28 . K(t − θ)	160	339,0 . K 2,17 . K(t − θ)
50	65,3 . K 1,35 . K(t − θ)	170	377,4 . K 2,27 . K(t − θ)
60	81,7 . K 1,43 . K(t − θ)	180	418,5 . K 2,38 . K(t − θ)
70	99,3 . K 1,50 . K(t − θ)	190	463,2 . K 2,50 . K(t − θ)
80	118,5 . K 1,55 . K(t − θ)	200	511,2 . K 2,62 . K(t − θ)
90	138,7 . K 1,59 . K(t − θ)	210	563,1 . K 2,75 . K(t − θ)
100	161,3 . K 1,65 . K(t − θ)	220	619,0 . K 2,88 . K(t − θ)
110	185,3 . K 1,72 . K(t − θ)	230	679,5 . K 3,03 . K(t − θ)
120	211,3 . K 1,80 . K(t − 0)	240	744,8 . K 3,24 . K(t − θ)
130	239,3 . K	250	848,7 . K

pouvoirs émissifs peu différents. Masson avait déjà reconnu que toutes les matières en poudre très-fine, obtenues par précipitation et non cristallisées, ont le même pouvoir émissif.

913. Pour éviter les calculs qu'exigerait la formule (2), j'ai renfermé dans le tableau du n° 912 les quantités de chaleur émises par rayonnement, par mètre carré et par heure, pour différents excès de température, en supposant l'enceinte à 15°, température ordinaire des lieux échauffés. Comme on peut supposer, sans erreur sensible, que la quantité de chaleur émise croît uniformément avec la température dans un intervalle de 10°, j'ai placé dans le tableau les formules qui représentent les quantités de chaleur émises en fonction de l'excès de température.

Si la température de l'enceinte était de

0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90° 100°,

les nombres du tableau précédent devraient être multipliés par

0,89 0,96 1,04 1,12 1,21 1,31 1,41 1,52 1,65 1,78 1,92.

914. *Chaleur transmise par le contact de l'air.* — La perte de chaleur provenant du contact de l'air est indépendante de la nature de la surface du corps et de la température de l'enceinte; elle ne dépend que de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte, et de la forme et des dimensions du corps. Cette perte de chaleur, par mètre carré et par heure, est donnée par la formule

$$A = 0{,}552K't^{1{,}233}$$

dans laquelle t représente l'excès constant de la température du corps sur celle de l'enceinte, et K′ un nombre qui varie avec la forme et les dimensions du corps.

915. Pour les corps sphériques, on a

$$K' = 1{,}778 + \frac{0{,}13}{r};$$

r représente le rayon de la sphère. En prenant successivement pour r

$0^m{,}5$ $0^m{,}10$ $0^m{,}20$ $0^m{,}40$ $0^m{,}80$

on trouve pour K′ les valeurs suivantes

4,38 3,08 2,43 2,10 1,94.

916. Pour les cylindres horizontaux à base circulaire, on a

$$K' = 2{,}058 + \frac{0{,}0382}{r},$$

r représentant le rayon du cylindre. En prenant successivement pour r

0m,05 0m,10 0m,15 0m,20 0m,25 0m,30 0m,40

on trouve pour K'

2,82 2,44 2,30 2,25 2,21 2,18 2,15.

917. Pour les cylindres verticaux, le refroidissement dépend à la fois de leur hauteur et de leur diamètre, et la valeur de K' est donnée par l'équation

$$K' = \left\{ 0{,}726 + \frac{0{,}0345}{\sqrt{r}} \right\} \left\{ 2{,}43 + \frac{0{,}8758}{\sqrt{h}} \right\}$$

Dans cette formule, r est le rayon du cylindre, et h sa hauteur.

918. Le tableau suivant renferme les valeurs de K' pour un certain nombre de hauteurs et de diamètres.

RAYON des CYLINDRES.	HAUTEUR DES CYLINDRES.						
	0m,50	1m	2m	3m	4m	5m	10m
0m,025	3,55	3,20	2,95	2,84	2,79	2,73	2,62
0m,05	3,22	2,90	2,69	2,57	2,52	2,48	2,38
0m,10	3,05	2,75	2,54	2,44	2,39	2,35	2,26
0m,20	2,93	2,65	2,45	2,35	2,30	2,26	2,17
0m,30	2,88	2,60	2,40	2,31	2,26	2,22	2,13
0m,40	2,85	2,57	2,37	2,28	2,23	2,20	2,11
0m,50	2,83	2,55	2,36	2 26	2,22	2,18	2,09

919. Pour les surfaces planes verticales, la valeur de K' est donnée par la formule empirique, h étant la hauteur verticale de la surface,

$$K' = 1{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{h}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

920. Le tableau suivant donne les valeurs de K′ pour diverses valeurs de h.

VALEURS DE h.	VALEURS DE K′.	VALEURS DE h.	VALEURS DE K′.
$0^m,10$	3,848	2^m	2,21
$0^m,20$	3,186	3^m	2,13
$0^m,30$	2,926	4^m	2,08
$0^m,40$	2,770	5^m	2,05
$0^m,50$	2,66	10^m	1,96
$0^m,60$	2,585	15^m	1,92
1^m	2,400	20^m	1,90

921. Le tableau suivant renferme les quantités de chaleur émises par mètre carré et par heure pour différents excès de température, et, de même que pour le tableau (912), les formules qui donnent, pour un intervalle de 10°, les quantités de chaleur émise en fonction de l'excès de température.

EXCÈS de TEMPÉRATURE.	VALEURS DE A.	EXCÈS de TEMPÉRATURE.	VALEURS DE A.
10°	9,4 . K′	130°	233,1 . K′
	1,05 . K′(t − θ)		1,74 . K′(t − θ)
20	22,2 . K′	140	244,4 . K′
	1,176. K′(t − θ)		1,76 . K′(t − θ)
30	36,6 . K′	150	266,1 . K′
	1,27 . K′(t − θ)		1,79 . K′(t − θ)
40	52,2 . K′	160	288,1 . K′
	1,34 . K′(t − θ)		1,81 . K′(t − θ)
50	68,6 . K′	170	310,5 . K′
	1,40 . K′(t − θ)		1,83 . K′(t − θ)
60	86,0 . K′	180	333,2 . K′
	1,46 . K′(t − θ)		1,85 . K′(t − θ)
70	104,0 . K′	190	356,1 . K′
	1,51 . K′(t − θ)		1,88 . K′(t − θ)
80	122,6 . K′	200	379,4 . K′
	1,55 . K′(t − θ)		1,90 . K′(t − θ)
90	141,7 . K′	210	402,9 . K′
	1,59 . K′(t − θ)		1,92 . K′(t − θ)
100	161,5 . K′	220	426,7 . K′
	1,63 . K′(t − θ)		1,95 . K′(t − θ)
110	181,5 . K′	230	450,7 . K′
	1,67 . K′(t − θ)		1,97 . K′(t − θ)
120	202,1 . K′	240	475,0 . K′
	1,70 . K′(t − θ)		1,99 . K′(t − θ)
130	223,1 . K′	250	498,6 . K′

922. On voit, à l'inspection des deux tableaux (n° 911 et n° 92, que la formule de Newton est complétement inexacte ; les coefficients des valeurs de R et A, au lieu de rester constants, varient pour des excès de température compris entre 0° et 250°. le premier, dans le rapport de 1 à 3,24 ; le second, dans le rapport de 1 à 2. La loi de Newton n'est approchée que pour de faibles excès de température.

923. En résumant ce qui précède, on a pour la valeur de M

$$M = R + A = 124{,}72Ka^{6}\left(a^{t} - 1\right) + 0{,}552K't^{1{,}233} \ldots\ldots\ldots (8)$$

Mais on pourra toujours, dans toutes les applications, calculer les valeurs de R et de A d'après les tableaux (911 et (922); on obtiendra ainsi, par des calculs très-simples, des approximations bien suffisantes.

924. Nous appliquerons ces formules à un cas qui se présente fréquemment : celui de tuyaux de fonte horizontaux chauffés par la vapeur à 100°, la température de l'enceinte étant de 15°.

Pour $r = 0^{m},05$, on a $M = 128{,}6 \cdot 3{,}36 + 132{,}15 \cdot 2{,}82 = 432 + 373 = 805$
— $r = 0^{m},10$ — $M = 128{,}6 \cdot 3{,}36 + 132{,}15 \cdot 2{,}44 = 432 + 322 = 774$
— $r = 0^{m},15$ — $M = 128{,}6 \cdot 3{,}36 + 132{,}15 \cdot 2{,}26 = 432 + 299 = 731$

Les quantités de vapeur condensées correspondantes sont $1^{k},50$; $1^{k},44$; et $1^{k},34$. Ces nombres sont un peu plus petits que ceux qui résultent des observations directes, probablement à cause de l'eau entraînée mécaniquement par la vapeur.

925. Pour un cylindre en tôle de 1 mètre de diamètre, placé dans un espace chauffé à 20°, et renfermant de la vapeur à 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 atmosphères, les excès de température seraient de

80° 101° 115° 125° 133° 140° 146° 152°

et les quantités de chaleur transmises par mètre carré et par heure seraient de

671 915 1015 1224 1335 1428 1523 1619.

926. Pour un tuyau de tôle horizontal de $0^{m},125$ de rayon renfermant de l'air à 150°, l'air extérieur étant à 15°, on aurait

$$M = 254 \cdot 2{,}77 + 233 \cdot 2{,}37 = 703 + 552 = 1255.$$

Influence des enveloppes sur l'émission de la chaleur.

927. *Influence des enveloppes fermées de toutes parts.* — Lorsqu'un vase rempli d'eau est environné de plusieurs enveloppes fermées de toutes parts, dont l'air ne peut pas se renouveler, la quantité de chaleur transmise diminue à mesure que le nombre des enveloppes augmente, et suivant une loi qu'on peut déterminer du moins approximativement.

Considérons un vase métallique plein d'eau, environné d'abord d'une seule enceinte exactement fermée et assez éloignée de la surface du vase pour que l'air s'y meuve facilement. Désignons par S et S′ les surfaces du vase et de l'enveloppe, par t et t' les excès de leurs températures sur celles de l'air, admettons que la transmission de la chaleur ait lieu suivant la loi de Newton, qui est suffisamment exacte, quand les excès de température sont peu considérables. Si la température du vase reste constante, les quantités de chaleur émises par le vase et l'enveloppe seront (908) $Q(t-t')S$, et $Qt'S'$, et comme ces quantités doivent être égales, on aura

$$S(t-t') = S't'; \quad \text{d'où} \quad t' = t \cdot \frac{S}{S+S'};$$

la quantité de chaleur M émise par le vase, qui était QSt quand il était sans enveloppe, deviendra

$$M = Q\frac{SS't}{S+S'}.$$

928. Si le vase était recouvert de deux enveloppes, les surfaces étant S, S′, S″, les excès de température t, t', t''; les quantités de chaleur émises par le vase, la première et la seconde enveloppe seront $QS(t-t')$; $QS'(t'-t'')$ et $QS''t''$; ces quantités étant égales entre elles, on trouve pour la valeur de t'' et pour la quantité de chaleur émise

$$t'' = \frac{SS't}{SS''+SS'+S'S''}; \quad \text{et} \quad M = Q\frac{SS'S''t}{SS''+SS'+S'S''}.$$

929. Si le vase était recouvert de trois enveloppes, on trouverait de même pour la quantité de chaleur émise

$$Q = M \cdot \frac{SS'S''S'''t}{SS'S''+S''S'''+S'S''S'''+SS'S''}.$$

930. Pour un nombre quelconque n d'enveloppes, la quantité de

chaleur émise serait égale à celle qui serait émise par le vase libre, multipliée par le produit des surfaces de toutes les enveloppes, divisée par la somme des produits $n - 1$ à $n - 1$ des surfaces du vase et des enveloppes.

931. J'ai fait quelques expériences pour vérifier l'exactitude de ces formules, et j'ai obtenu des résultats qui s'accordent assez bien avec le calcul. J'ai d'abord employé un vase de fer-blanc cylindrique et terminé par deux cônes ; les enveloppes étaient de même matière et de même forme, et leurs distances étaient à peu près $0^m,005$; les surfaces du vase et des enveloppes étaient dans les rapports des nombres 260, 321, 420, 480, 560. Dans les mêmes circonstances, les quantités de chaleur émises par le vase seul et recouvert successivement de 1, 2, 3 et 4 enveloppes, ont été de

1 0,59 0,44 0,34 0,31,

tandis que celles qui résultent des formules sont

1 0,57 0,41 0,33 0,28.

932. Si les enveloppes différaient peu les unes des autres, en les regardant comme égales, la différence des températures de deux enveloppes consécutives serait constante et on aurait pour l'excès de température t' de la dernière enveloppe et pour la quantité de chaleur émise M

$$t' = \frac{t}{n+1}; \quad \text{et} \quad M = Q \cdot \frac{St}{n+1}.$$

Cette égalité pourrait être obtenue, si le vase n'émettait de la chaleur que par une surface plane, et s'il y avait au delà une série de surfaces planes maintenues par un corps conduisant mal la chaleur. Quand les enveloppes sont très-grandes et suffisamment rapprochées, on peut aussi négliger les différences de leurs surfaces.

933. Lorsque les enveloppes ont des pouvoirs rayonnants très-différents, les calculs deviennent compliqués, et ne présentent plus autant de certitude. Je rapporterai seulement une série d'expériences faites sur le même vase dont j'ai déjà parlé, peint avec un vernis noir et recouvert d'enveloppes en fer-blanc. Le vase étant successivement seul et recouvert de 1, 2, 3, 4 enveloppes, les quantités de chaleur émises dans les mêmes circonstances ont été

1 0,38 0,35 0,30 0,25

934. Le même vase de fer-blanc, mais sans vernis, ayant été exposé à l'air sans enveloppe, et ensuite placé sous une cloche de verre, les quantités de chaleur émises ont été dans le rapport des nombres 1 et 0,78; la surface du vase était de $0^m,026$ et celle de la cloche de $0^m,032$. Pour le même vase recouvert de noir de fumée et la même cloche, le rapport a été celui de 1 à 0,50. Les résultats ont été sensiblement les mêmes pour des cloches de verre ayant $0^m,0446$ et $0^m,0611$. Pour une cloche de $0^m,1350$, le rapport a été celui de 1 à 0,61. Ainsi, on peut admettre que, quand les corps n'ont pas un grand pouvoir rayonnant, la quantité de chaleur émise est presque diminuée de moitié par une enveloppe de verre dont la surface n'excède pas le triple de la surface du corps.

935. Le même vase de fer-blanc, recouvert d'un vernis noir, étant environné successivement de 1, 2, 3, 4 cloches de verre, séparées par des intervalles de $0^m,005$, les quantités de chaleur émises, dans les mêmes circonstances, ont été de 1 ; 0,50 ; 0,34 ; 0,30. En plaçant autour du vase les deux dernières cloches, la quantité de chaleur émise a été de 0,42. Chacune des cloches de verre employées dans ces expériences était percée au sommet d'un orifice à travers lequel passait la tige du thermomètre (le réservoir plongeant dans le vase plein d'eau), et reposait sur une table de bois, recouverte d'une lame de ouate ; on avait pris les précautions nécessaires pour éviter le passage de l'air par les orifices des cloches.

936. Les formules relatives aux enveloppes multiples ne se vérifient sensiblement que lorsque ces enveloppes sont assez éloignées les unes des autres pour que l'air se meuve facilement dans les espaces qui les séparent. Quand elles sont très-rapprochées, la quantité de chaleur transmise décroît avec leur nombre, suivant une loi beaucoup moins rapide. C'est un résultat tout à fait opposé à celui qu'on devait attendre, parce qu'il semble que, l'air étant gêné dans ses mouvements, la transmission d'une enveloppe à la suivante est uniquement due au rayonnement ; mais il y a, par l'air immobile, une transmission directe dont il faut tenir compte. Nous verrons plus loin les formules applicables à ce cas particulier.

937. *Influence des enveloppes ouvertes à la partie supérieure et à la partie inférieure.* — Les enveloppes dont il est question, ralentissent le refroidissement dû au rayonnement, mais elles accélèrent celui qui provient du contact de l'air, en augmentant la vitesse de sa circulation. Pour reconnaître l'influence de ces enveloppes sur le refroidissement total, j'ai observé dans les mêmes circonstances le

refroidissement d'un vase noirci, quand il était sans enveloppe, et successivement environné de 1, 2, 3 et 4 cylindres de tôle ouverts par les deux bouts, ayant des diamètres croissants de $0^m,01$. Ces cylindres étaient suspendus de manière que l'air pût facilement y pénétrer. Pour un même abaissement du thermomètre du vase et la même température extérieure, il a fallu 13′3″ ; 19′57″ ; 15′44″ ; et 15′40″. Avec un cylindre de fer-blanc dont le diamètre excédait celui du vase de $0^m,03$, la durée du refroidissement a été de 17′44.

Il résulte de là que, pour les corps ayant un grand pouvoir émissif, des enveloppes cylindriques de même hauteur, ouvertes par les deux bouts, ralentissent le refroidissement. Mais il n'en serait plus ainsi, si la vitesse de l'air, dans les espaces annulaires formés par le corps et les enveloppes, était augmentée par le prolongement des enveloppes, ou par toute autre cause ; la vitesse du refroidissement pourrait non-seulement dépasser celle du corps sans enveloppe, mais elle pourrait augmenter indéfiniment avec la vitesse de circulation de l'air. Lorsque le vase est en métal poli, une seule enveloppe accélère le refroidissement ; les autres sont sans influence.

Émission de la chaleur dans l'air par les tuyaux.

938. *Émission de la chaleur dans l'air qui parcourt un tuyau dont les surfaces sont maintenues à une température constante.* — Considérons un tuyau métallique dont la surface soit maintenue à une température constante, et dans lequel passe un courant d'air ; supposons que toutes les veines élémentaires aient sensiblement la même vitesse, ou qu'une tranche d'air perpendiculaire à la surface du tuyau, prise à l'origine, conserve sa forme pendant qu'elle parcourt le tuyau. Dans son trajet, la circonférence de cette tranche sera à la température du tuyau et la chaleur se propagera de sa circonférence au centre ; après un certain temps, la tranche d'air aura sensiblement la température du tuyau ; si, à cet instant, elle n'a pas parcouru toute la longueur du tuyau, le reste de son parcours sera évidemment sans influence ; si, à la sortie du tuyau, la chaleur n'a pas eu le temps de se propager jusqu'au centre, la température moyenne de la tranche sera d'autant plus élevée qu'elle sera restée plus longtemps dans le tuyau. La température de l'air sortant dépendra donc de la vitesse d'écoulement et de la longueur du tuyau.

Nous avons supposé que le tuyau était circulaire et que la tranche était toujours renfermée entre deux plans ; mais tout ce que nous

avons dit est également vrai pour un tuyau de forme quelconque, et malgré la différence de vitesse des veines élémentaires qui a toujours lieu; seulement le temps nécessaire pour que le centre de la veine prenne la température de la circonférence augmentera avec la différence de vitesse. Nous ajouterons que, quand le tuyau est horizontal, ou plus ou moins incliné, la répartition de la chaleur dépend non-seulement de la transmission à travers l'air, mais des mouvements qui résultent de l'échauffement de l'air. On voit, d'après cela, combien les phénomènes qui se produisent dans l'échauffement de l'air, qui parcourt un tuyau à une température constante, sont compliqués; on peut toutefois déduire de ce qui précède quelques principes généraux utiles dans certaines circonstances.

1° Lorsqu'un courant d'air parcourt un tuyau, maintenu à une température constante, supérieure à celle de l'air, en supposant que la vitesse, d'abord très-petite, augmente progressivement, l'air sortira à la température du tuyau jusqu'à une certaine limite de vitesse qui dépendra du contour du tuyau, de sa section et des inégalités de vitesse des différentes veines élémentaires. Cette vitesse augmentera à mesure que le tuyau aura une plus petite section. Il est impossible de prévoir, si, dans les mêmes conditions, cette vitesse serait plus grande ou plus petite quand le tuyau est vertical que quand il est horizontal, parce que, dans le premier cas, les accroissements de vitesse résultant de l'échauffement contre les parois, appellent de l'air intérieur, tandis que, dans le second cas, les couches d'air en contact avec la surface inférieure sont constamment déplacées, circonstances qui tendent toutes les deux à répartir la chaleur.

2° Lorsque la limite de vitesse dont je viens de parler a été atteinte, l'air s'échappe à une température décroissante, parce que dans chaque tranche la température est décroissante de la circonférence au centre, et d'autant plus que la vitesse de l'air est plus grande; mais la quantité de chaleur entraînée par l'air augmente avec sa vitesse; c'est un fait bien constaté par l'expérience, et qui s'explique facilement, en admettant que la somme des quantités de chaleur propagées dans chaque tranche augmente très-rapidement avec le temps, car le nombre des tranches écoulées dans l'unité de temps étant proportionnel à la vitesse, et le temps du séjour de chaque tranche étant en raison inverse de la vitesse, si la quantité de chaleur qui se propage dans une tranche croît très-rapidement avec le temps, la quantité de chaleur entraînée par l'air augmentera avec la vitesse.

939. Dans la pratique, on peut admettre, comme une approximation suffisante, que la quantité de chaleur émise par le tuyau est sensiblement égale à celle qu'il émettrait à l'air libre, par le contact de l'air, à une température moyenne entre celle de l'entrée et celle de la sortie. J'ai vérifié ce principe, au moyen d'un vase cylindrique de $0^m,40$ de hauteur et de $0^m,20$ de diamètre, percé au centre d'un canal de $0^m,10$ de diamètre, dont toutes les surfaces étaient couvertes de papier; en observant le refroidissement, quand l'orifice du canal était ouvert et quand il était fermé, j'ai reconnu que dans ce dernier cas la perte de chaleur était à peu près la moitié de celle du tuyau central à l'air libre.

940. *Émission de la chaleur dans l'air qui parcourt un canal renfermant un tuyau maintenu à une température constante.* — Ce cas a la plus grande analogie avec le précédent, seulement la diffusion de la chaleur s'effectue plus rapidement, parce que les couches d'air concentriques vont en augmentant de surface à mesure qu'elles sont plus éloignées de la surface du tuyau, et la surface intérieure du canal étant chauffée par rayonnement échauffe aussi les couches d'air en sens contraire de l'échauffement par le tuyau. Ici, comme dans le cas précédent, il y a une limite de vitesse au-dessous de laquelle l'échauffement de l'air est complet, et au delà de laquelle la température de l'air diminue, quoique la quantité de chaleur entraînée croisse avec la vitesse.

941. Dans le cas dont il s'agit, on peut prendre approximativement, pour la quantité de chaleur émise, celle que le tuyau émettrait à l'air libre à la température moyenne entre celle d'entrée et celle de sortie.

942. A ce sujet, voici le résultat de deux expériences faites à la prison d'Étampes pour comparer les effets produits par des tuyaux verticaux et horizontaux, pleins d'eau chaude, placés dans un canal parcouru par l'air à échauffer.

Pour les tuyaux verticaux de $0^m,11$ de diamètre, ayant une surface de $1^{mq},20$, le volume d'air, chauffé à 60° par heure, a été de 52^{mc}.

Pour les tuyaux horizontaux de $0^m,135$ de diamètre, ayant une surface de $2^{mq},30$, le volume d'air, chauffé à 60° par heure, a été de 34^{mc}.

D'après ces expériences, il semblerait que les tuyaux transmettent plus de chaleur à l'air quand ils sont verticaux que quand ils sont horizontaux. Il est probable que les tuyaux renfermaient de l'eau sensiblement à la même température, mais il aurait fallu savoir comment

étaient disposés les canaux renfermant les tuyaux; car si le canal horizontal était pratiqué dans le sol, et le canal vertical dans une muraille, ou en saillie, les quantités de chaleur transmises à travers les parois du canal auraient pu produire les différences observées; la section des canaux pouvait aussi avoir de l'influence. On ne peut donc réellement rien déduire de certain de ces expériences.

CHAPITRE II

Transmission de la chaleur à travers les corps solides.

943. Lorsqu'un corps solide est terminé par deux faces parallèles maintenues à des températures constantes, mais différentes, le corps est traversé par un flux constant de chaleur proportionnel à la surface et à la différence de température des deux faces, et en raison inverse de la distance de ces deux faces. Cette loi peut se déduire de la nature même du mouvement de la chaleur. En effet, considérons une plaque homogène, d'une épaisseur e, ayant une surface égale à l'unité, et dont les faces sont maintenues à des températures constantes t et t'. Imaginons que l'épaisseur de la plaque soit divisée en un très-grand nombre de tranches très-minces; la plaque entière étant évidemment traversée dans le même temps par une quantité de chaleur égale à celle qui traverse une partie quelconque de la plaque, la même quantité de chaleur devra passer dans le même temps à travers chacune des tranches élémentaires en question; or, comme, pour un même corps, la quantité de chaleur transmise ne peut dépendre que de l'épaisseur et de l'excès de température, et que les épaisseurs sont les mêmes, il s'ensuit nécessairement que les excès de température des faces sont les mêmes, et, par conséquent, que, dans l'épaisseur de la plaque, la température varie uniformément de t à t'; mais la quantité de chaleur qui traverse une tranche étant la même que celle qui traverse un nombre quelconque de tranches, comme les différences de température des faces extrêmes sont proportionnelles aux nombres des tranches, et qu'il en est de même des épaisseurs, l'égalité en question ne peut subsister qu'autant que le flux de chaleur est proportionnel à l'excès de température et en raison inverse de l'épaisseur; on a donc :

$$\mathrm{M} = \frac{\mathrm{C}(t - t')}{e} = (t - t') : \frac{e}{\mathrm{C}}.$$

Dans cette expression, M représente la quantité de chaleur transmise par unité de surface et dans l'unité de temps, t et t' les températures des deux faces, e l'épaisseur de la plaque, et C la *conductibilité* de la matière, c'est-à-dire la valeur de M pour $t - t' = 1$ et pour $e = 1$.

Cette formule a été vérifiée par expérience.

Nous examinerons successivement la conductibilité des corps bons conducteurs de la chaleur, c'est-à-dire des métaux, et ensuite celle des corps mauvais conducteurs.

Conductibilité des métaux.

944. Lorsqu'une barre métallique est maintenue par une de ses extrémités à une température constante, la chaleur se propage dans la barre et se perd par sa surface. En supposant que la barre soit assez longue pour que la chaleur ne parvienne pas à son extrémité, et qu'elle ait une section assez petite pour que tous les points de la même section aient sensiblement la même température, on trouve facilement par le calcul, pour l'excès de la température y d'une section sur celle de l'air, à une distance x de l'extrémité, la relation

$$y = Ae^{-x\sqrt{\frac{ph}{Cs}}}$$

dans laquelle A représente l'excès constant de la température de l'extrémité échauffée sur celle de l'air, s la section de la barre, p le contour de la section, h le coefficient de refroidissement et C la conductibilité de la barre.

945. En 1816, M. Biot a vérifié l'exactitude de cette formule par de nombreuses expériences (*Traité physique*, 1816). Plus tard, en 1836, M. Despretz a fait de nouvelles expériences qui ont confirmé celles de M. Biot, et qui lui ont permis de déterminer les rapports de conductibilité des métaux. Ce physicien a donné pour ces rapports les nombres suivants :

Or	1000	Fer	374
Platine	981	Zinc	363
Argent	973	Étain	303
Cuivre	898	Plomb	179

946. Mais ces nombres ne peuvent pas être considérés comme très-exacts, d'abord parce que la loi de Newton, sur laquelle repose la formule (954), s'éloigne trop de la vérité quand les excès de tempéra-

ture sont considérables, et en outre parce que les températures des différents points des barres ont été mesurées en y creusant des trous pour y loger les réservoirs des thermomètres, circonstance qui produit des étranglements dans les barres, et doit avoir eu une certaine influence sur les résultats.

MM. Franz et Wiedmann ont repris ces expériences en opérant sur des barres minces et en déterminant les températures au moyen d'un couple thermo-électrique ; ils ont obtenu les résultats suivants qui diffèrent notablement de ceux de Despretz :

Argent.....	1000	Fer.....	119
Cuivre.....	736	Acier.....	116
Or.....	532	Plomb.....	85
Étain.....	145		

947. Les nombres trouvés ci-dessus, ne représentant que des rapports, ne pourraient servir à aucun calcul dans les applications, tant qu'on ne connaîtrait pas la valeur absolue de la conductibilité d'un de ces métaux. En 1841 j'ai repris la question, et j'ai fait, pour déterminer cette conductibilité en unités de chaleur, un grand nombre d'expériences dont on trouvera les détails dans une note placée à la fin de la 3e édition; ici, je me bornerai à une description sommaire de l'appareil employé et à l'énoncé des résultats obtenus.

Un vase cylindrique, plein d'eau et environné d'une matière conduisant mal la chaleur, est fermé par une plaque métallique dont le contour est séparé de la paroi du vase par un anneau de liége ; la surface inférieure de la plaque est chauffée par la vapeur, et on observe le réchauffement de l'eau qui est continuellement mise en mouvement par un agitateur. En admettant que la quantité de chaleur qui traverse la plaque soit proportionnelle à la différence de température de ces deux faces, on a, en observant que cette quantité de chaleur est proportionnelle à la vitesse de refroidissement (894),

$$dT = -aTdt; \quad \text{et} \quad m \log T = C - at$$

m étant le module des tables de logarithmes, 2,3025, et T la différence de température après le temps t. En désignant par A la température qui correspond à $t = 0$, comme on doit avoir dans ce cas $T = A$, on trouve $C = m \log A$, et la formule donne

$$a = \frac{m}{t}(\log A - \log T),$$

les logarithmes étant ceux des tables et a le refroidissement qui aurait lieu en une seconde pour un excès de température de 1°. Deux observations donnaient une valeur de a, et l'identité de ces valeurs déduites de différentes observations combinées deux à deux constatait l'exactitude de la loi supposée. Ces expériences, répétées avec des plaques de cuivre, de plomb, de zinc, d'étain, de fer et de fonte, ont donné les mêmes résultats. Mais, ce qui m'a d'abord beaucoup étonné, les valeurs de a étaient sensiblement les mêmes pour ces différents métaux, quelle que fût leur épaisseur, quoiqu'elle eût varié de 1 à 20 millimètres. Dans toutes ces expériences, j'avais remarqué une influence très-sensible de la vitesse de rotation de l'agitateur; la valeur de a augmentait ou diminuait notablement avec cette vitesse. En considérant, en outre, que la vapeur, en se condensant, devait couvrir la surface inférieure de la plaque d'une couche d'eau presque stagnante, il était très-probable que, dans ces expériences, la surface de la plaque chauffée par la vapeur n'était pas à 100°, et que l'autre face n'était pas non plus à la température indiquée par le thermomètre. La chaleur traversait réellement une lame métallique comprise entre deux lames d'eau, dont l'une était sensiblement immobile, et l'autre ne se renouvelait que lentement ; et, comme la conductibilité de l'eau est très-petite relativement à celle des métaux, l'influence de la conductibilité du métal disparaissait.

948. Pour vérifier cette conjecture, j'ai supprimé le chauffage par la vapeur; j'ai rempli le vase supérieur d'eau à 0°, et j'ai plongé la plaque, qui le fermait inférieurement, de 1 à 2 millimètres dans un vase rempli d'eau à la température ordinaire ; j'ai terminé l'agitateur intérieur par des bandes de crin qui, dans le mouvement, rasaient la surface de la plaque, et l'eau qui mouillait l'autre face était renouvelée au moyen d'un ruban de fil tendu de champ dans un carré horizontal, auquel on donnait un mouvement rapide de va-et-vient. Par cette disposition l'échauffement de l'eau du vase était très-lent, et le liquide qui mouillait les faces de la plaque pouvait être renouvelé avec rapidité. En employant des plaques de plomb, ayant des épaisseurs comprises entre $0^m,001$ et $0^m,025$, les valeurs de a ont varié de $0^m,00060$ à $0^m,00025$. Les autres métaux ont donné des résultats analogues.

Je devais penser, d'après cela, qu'en augmentant beaucoup la vitesse de renouvellement des liquides qui baignent les deux faces des plaques, et en employant des plaques épaisses des métaux les moins

conducteurs, on arriverait à des coefficients qui seraient dans le rapport inverse des épaisseurs.

949. Je disposai pour cela un nouvel appareil, dans lequel l'agitateur intérieur était mis en mouvement par un système d'engrenage ; l'agitateur extérieur consistait en une roue horizontale excentrique au vase, également mise en mouvement par un engrenage, et dont les rayons étaient formés par des tresses fortement tendues, qui, dans le mouvement de rotation, frottaient contre la surface extérieure de la plaque.

La figure 165 représente une coupe verticale de ce dernier appareil, la figure 166 une projection horizontale, et la figure 167 une coupe à plus grande échelle de la partie inférieure du vase. ABCD est un vase en fer-blanc fermé inférieurement par la plaque métallique E, dont la figure 167 indique le mode d'ajustement. Ce vase renferme un tube en cuivre qui porte des palettes placées à différentes hauteurs et à la partie inférieure des toiles de crin; le tube est guidé dans son mouvement par deux anneaux qui l'enveloppent et qui sont fixés dans leurs positions par les tiges II et I'I', et il est terminé supérieurement par une petite roue dentée mise en mouvement au moyen de la manivelle M'.

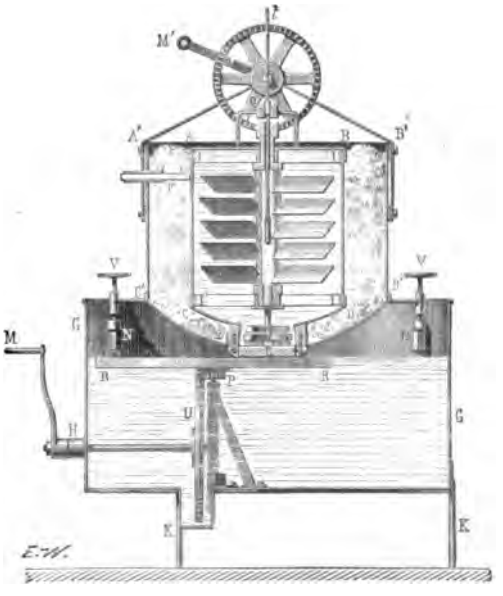


Fig. 165.

Le vase est fermé par un couvercle dont les bords sont mastiqués. et à travers lequel passe le tube qui porte les ailes destinées à agiter le liquide; ce couvercle porte un anneau O, suspendu à 1 centimètre au-dessus du tuyau, dans lequel on place un bouchon percé, à travers lequel passe la tige du thermomètre dont le réservoir se trouve à peu près au milieu du vase, et qui reste fixe pendant le mouvement des agitateurs. A'B'C'D' est un second vase qui enveloppe le

premier, auquel il est fixé par trois tiges de verre F,F,F ; il est rempli de coton cardé, et garni de trois pieds à vis V,V,V, qui se placent sur les supports N,N, soudés au vase inférieur GG ; le vase A'B'C'D' supporte la roue dentée à manivelle qui engrène avec le pignon du tube central. Enfin le vase GG renferme une roue horizontale RR, dont les ailes en tresse frottent dans leur mouvement la

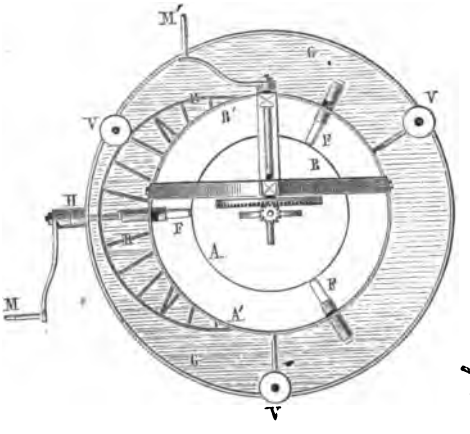


Fig. 166.

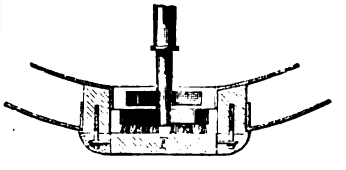


Fig. 167.

surface inférieure de la plaque E ; cette roue est mise en mouvement par le pignon P, la roue dentée U et la manivelle M, dont l'axe traverse la boîte à étoupe H.

Au moyen de cet appareil j'ai pu renouveler 1600 fois par minute le liquide en contact avec les faces de la plaque métallique. En plaçant dans le vase ouvert de l'eau à peu près à 24°, dans le vase intérieur de l'eau à la température ordinaire, et en employant des plaques de plomb, l'une de $0^m,020$, l'autre de $0^m,015$ d'épaisseur, dans les mêmes circonstances, la durée du même réchauffement du vase intérieur a été de 500″ pour la première plaque, et de 380″ pour la seconde ; ce dernier chiffre ne diffère que de 5″ des trois quarts du premier. Ainsi l'on peut considérer la loi des épaisseurs comme vérifiée directement.

Dans ces expériences, la température moyenne du bain extérieur a été de 24°,04, et n'a différé des températures extrêmes que d'une petite fraction de degré ; les excès de températures au commencement et à la fin des expériences étaient 8°,91 et 9°,55. Alors la quantité de chaleur transmise à travers la plaque de $0^m,020$ d'épaisseur était 0,000294 par minute ; le poids de l'eau renfermée dans

le vase, augmenté du poids du vase multiplié par sa capacité calorifique, étant de $3^k,287$, la quantité de chaleur qui serait transmise à travers la plaque pour une différence de température de 1°, serait égale à

$$0,000294 \times 3,287 = 0,000966;$$

et comme la plaque avait $0^m00,5026$ de surface, la quantité d'unités de chaleur qui serait transmise dans les mêmes circonstances à travers 1 mètre carré, serait

$$0,000966 \times \frac{1}{0,005026} = 0,192$$

et pour une plaque de 1 mètre d'épaisseur, et pendant une heure, elle serait

$$0,192 \,.\, 0,02 \,.\, 3600 = 13,83.$$

950. Alors, en admettant les rapports de conductibilité des métaux trouvés par M. Despretz, on obtient les nombres suivants pour les quantités de chaleur qui seraient transmises dans une heure à travers des plaques de 1 mètre carré de surface, de 1 mètre d'épaisseur, et dont les surfaces seraient maintenues à des températures constantes qui différeraient de 1°.

Or	77	Fer	28
Platine	75	Zinc	28
Argent	74	Étain	22
Cuivre	69	Plomb	14

En prenant les nombres de MM. Franz et Wiedmann, on aurait :

Argent	164	Fer	19
Cuivre	121	Acier	19
Or	87	Plomb	14
Étain	24		

Mais ces conductibilités ont été obtenues dans des circonstances particulières qui ne se rencontrent jamais dans la pratique.

D'après d'anciennes expériences de Clément, une plaque de cuivre de 1 mètre carré de surface, de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, en contact d'un côté avec de la vapeur à 100°, et de l'autre avec de l'eau à 28°, condense par heure 100 kil. de vapeur, pour une différence de température de 72°, et par conséquent $1^k,30$ pour une différence de 1°.

D'après des expériences plus récentes de MM. Thomas et Laurens, dans lesquelles le cuivre était disposé en un seul tuyau d'un petit diamètre, on a évaporé 400 kil. d'eau par heure et par mètre carré, pour une différence de température de 45°, ce qui fait 9 kil. pour une différence de température de 1°. Le chiffre obtenu par MM. Thomas et Laurens est beaucoup plus élevé que celui de Clément, parce que, la surface de transmission étant celle d'un tuyau d'un petit diamètre, l'air était complétement expulsé, circonstance qui augmente beaucoup la quantité de vapeur condensée.

On voit que, dans les circonstances même les plus favorables, le chiffre obtenu pour la transmission de la chaleur à travers le cuivre, quand on ne renouvelle pas le liquide qui mouille les surfaces, est beaucoup plus petit que celui qui résulte des expériences que nous avons rapportées, à cause de la couche d'eau sensiblement immobile qui recouvre au moins une des surfaces.

951. Ainsi, quoique les lois de la transmission de la chaleur à travers les plaques, admises par les physiciens, soient exactes, ces lois ne sont point applicables à la transmission de la chaleur d'un liquide à un autre, à travers une plaque métallique ; et on peut admettre que, dans les limites d'épaisseurs généralement employées, la nature et l'épaisseur du métal sont sans influence sensible ; mais si, dans certains cas, il y avait un grand avantage à augmenter cette transmission, même en dépensant du travail, on y parviendrait par une agitation qui renouvellerait très-rapidement les couches liquides en contact avec les surfaces des plaques.

Tout ce qui précède suppose que les deux surfaces des plaques sont en contact avec des liquides, et par conséquent ne doit être appliqué qu'au chauffage des liquides par des liquides, ou par la vapeur ; car la vapeur, en se condensant contre les surfaces des plaques, les mouille, et tout se passe comme si le chauffage avait lieu par un liquide. Mais quand les liquides sont chauffés par des gaz, et quand les gaz sont chauffés par d'autres gaz, en est-il encore ainsi? C'est ce que nous allons examiner.

952. Parlons d'abord du chauffage des liquides par les gaz : c'est, par exemple, le cas des chaudières à vapeur, du moins pour la partie des chaudières qui ne reçoit pas le rayonnement du foyer. Je n'ai point fait d'expériences directes à ce sujet ; mais les résultats de la pratique ne permettent pas de douter que, si la nature et l'épaisseur du métal ont une influence, elle est très-petite ; car on a reconnu depuis longtemps que les chaudières de fonte, de cuivre et de tôle de

mêmes dimensions, mais dans lesquelles le métal a des épaisseurs très-variables, donnent sensiblement les mêmes produits dans les mêmes circonstances : c'est un fait sur lequel tous les ingénieurs sont d'accord. On peut d'ailleurs facilement s'en rendre compte. Lorsque l'épaisseur du métal augmente ou que sa conductibilité diminue, la température de sa surface extérieure augmente : c'est un fait bien constaté, car, dans les chaudières de fonte, la surface extérieure rougit souvent, et quant aux chaudières de fer, l'altération qu'elles éprouvent par l'action de la chaleur augmente avec leur épaisseur ; mais comme la quantité de chaleur qui se transmet augmente avec la température de la surface extérieure, on conçoit que l'influence de la nature et de l'épaisseur du métal doit être très-faible. C'est d'ailleurs ce qui a été constaté par des expériences récentes de M. Boutigny ; en faisant évaporer de l'eau dans des capsules d'argent, de même forme et de mêmes dimensions extérieures, mais d'épaisseurs très-différentes, les quantités d'eau évaporées, dans les mêmes circonstances et dans le même temps, ont été exactement les mêmes.

953. Quant à la transmission de la chaleur d'un gaz à un autre gaz à travers une plaque métallique, comme, à volume égal, les gaz ont une chaleur spécifique beaucoup plus petite que les liquides et que leur conductibilité est très-faible, on peut regarder l'influence de la nature et de l'épaisseur de la plaque comme étant absolument nulle, attendu que la quantité de chaleur qui peut traverser la plaque, même dans les cas les plus défavorables, est incomparablement plus grande que celle qui la traverse réellement, et par conséquent, dans aucun cas, l'épaisseur du métal ne peut ralentir la transmission. La quantité de chaleur qui traverse la plaque est uniquement déterminée par la différence de température des deux gaz, les pouvoirs absorbants et émissifs des deux surfaces de la plaque, et surtout par les mouvements des lames de gaz qui sont en contact avec les surfaces de la plaque métallique.

Ainsi on voit que, dans tous les cas, le renouvellement rapide des couches de liquide ou de gaz, qui touchent les surfaces de la plaque métallique, a une très-grande influence sur la transmission de la chaleur, mais que cette circonstance est beaucoup plus importante pour les gaz que pour les liquides.

954. On doit donc chercher la disposition des appareils la plus favorable à ce renouvellement, par l'effet seul des mouvements que les fluides doivent prendre pour entrer et sortir des appareils, et

par ceux qui résultent du réchauffement et du refroidissement. Mais, pour les gaz, on peut en outre produire artificiellement dans leurs masses des mouvements qui occasionnent un renouvellement rapide des couches en contact avec les surfaces métalliques, soit par une action directe qui n'exigerait qu'un faible travail, soit en employant une partie de la force qui résulte de l'écoulement.

955. Considérons, par exemple, de l'air brûlé à une haute température, s'écoulant dans un canal cylindrique horizontal, environné d'eau qu'il doit échauffer. Les couches d'air qui sont en contact avec le métal se refroidissent très-rapidement ; mais toutes les petites veines élémentaires n'ayant qu'une vitesse parallèle à l'axe du canal, les couches changeront de place très-lentement ; car la seule cause du changement réside dans l'accroissement de densité qui résulte du refroidissement ; elle n'existe que pour la moitié supérieure du canal, et elle ne tend à produire le déplacement qu'avec une faible vitesse. Il en serait évidemment de même pour toute autre direction du canal. On conçoit, d'après cela, que si la section du canal est très-grande, ainsi que la vitesse de l'air brûlé à sa sortie, la plus grande partie des veines centrales n'auront pas été amenées en contact avec l'enveloppe, et qu'elles auront conservé leur température primitive. Mais si on plaçait dans le canal des roues à palettes montées sur le même axe et mises en mouvement par un moteur quelconque, les veines centrales seraient jetées à la surface intérieure du cylindre, et on obtiendrait ainsi un bien plus grand refroidissement du gaz. Le mouvement du gaz du centre à la circonférence pourrait même être produit par le mouvement de translation du gaz lui-même ; il suffirait, pour cela, de placer dans le canal un certain nombre de roues à palettes inclinées sur l'axe comme les ailes des moulins à vent ; ces appareils, auxquels le mouvement de translation du gaz imprimerait une certaine vitesse de rotation, produiraient évidemment l'effet des roues à palettes dont les plans passent par l'axe de rotation.

956. On pourrait encore augmenter la transmission de la chaleur par un autre procédé qui, dans certains cas, pourrait être très-efficace.

Nous avons vu que dans la transmission de la chaleur à travers une plaque, il faut distinguer l'absorption par une des faces, l'émission par l'autre et la transmission à travers la plaque ; et nous savons que, dans les circonstances ordinaires, la quantité de chaleur que peut transmettre la plaque est beaucoup plus grande que celle qu'elle

peut absorber ou émettre. Il résulte de là que si, au lieu d'employer des plaques façonnées de différentes manières, on se servait de plaques traversées par des barres, plongeant jusqu'à une certaine profondeur dans les deux fluides liquides ou gazeux, dont l'un doit échauffer l'autre, on augmenterait l'étendue des surfaces en contact avec les deux fluides, et par suite l'effet produit ; d'autant plus que les lames des fluides en contact avec les surfaces des barres seraient constamment renouvelées par le mouvement de translation des fluides.

Considérons, par exemple, un canal horizontal parcouru par de l'air brûlé, et devant servir à échauffer de l'air que l'on fait mouvoir, en sens contraire, dans un canal enveloppant ; si la surface du canal intérieur est traversée par des barres métalliques qui se prolongent en dehors d'une certaine quantité, et si elles ne sont pas disposées dans les mêmes plans, les parties intérieures des barres s'échaufferont dans toute leur étendue, et cette chaleur se dissipera sur les surfaces extérieures ; le courant d'air brûlé pourra être refroidi uniformément dans tous les points de sa section, et la chaleur sera transmise dans tous les points de la section du courant d'air extérieur. Cette disposition peut être utile, surtout quand il est important d'effectuer la transmission dans un petit espace ; mais elle a souvent des inconvénients, soit pour la construction des appareils, soit par la difficulté de nettoyer les surfaces d'absorption ou d'émission.

957. En principe, toutes les fois qu'il s'agit de faire passer de la chaleur d'un corps en mouvement dans un autre, il est important que ce dernier se meuve en sens contraire ; car, à mesure que le corps chaud marche, il rencontre le corps auquel il doit transmettre sa chaleur à une plus basse température, et la transmission continue, ce qui n'arriverait pas si les corps marchaient dans le même sens. Considérons, par exemple, deux tuyaux concentriques, le tuyau intérieur, étant parcouru par l'air chaud ou de l'eau chaude ; l'intervalle des deux tuyaux, que je suppose d'une section égale à celle du tuyau intérieur, étant parcouru par de l'air froid ou de l'eau froide, mais en sens contraire ; si les tuyaux ont une assez grande longueur, et les fluides une assez faible vitesse, il est évident qu'il y aura un échange complet de température à la sortie de l'air ou de l'eau, tandis que si les deux fluides marchaient dans le même sens, comme l'un se refroidit et que l'autre s'échauffe, leurs températures se rapprocheraient constamment, elles finiraient par être égales, et, à partir de ce point, la transmission s'arrêterait.

Conductibilité des corps mauvais conducteurs.

958. Il n'en est pas des corps mauvais conducteurs comme des métaux ; dans presque tous les cas ils propagent toute la chaleur qu'ils peuvent réellement transmettre et leur faculté conductrice est très-importante à connaître.

M. Despretz est le seul physicien qui se soit occupé de la conductibilité de quelques-uns de ces corps. Des expériences faites sur la propagation de la chaleur à travers des barres de marbre, de porcelaine et de terre cuite, ont donné pour le rapport de conductibilité de ces trois corps, les nombres 23,6 ; 12,2 ; 11,4. Mais ce mode d'expérience présente, indépendamment des causes d'erreur que nous avons signalées (946), en parlant de la conductibilité des métaux, celle qui résulte de l'hypothèse de l'uniformité de température dans tous les points d'une même section, hypothèse qui s'éloigne d'autant plus de la vérité que le corps est plus mauvais conducteur. D'ailleurs, les résultats de ces expériences, en supposant même qu'ils fussent parfaitement exacts, ne donnant que des rapports, ne pouvaient servir à rien dans les applications.

959. Dans la seconde édition de cet ouvrage, j'ai donné les résultats de quelques expériences faites pour déterminer la conductibilité des corps dont il s'agit ; mais les méthodes que j'avais employées n'étaient pas assez exactes pour donner, dans tous les cas, des résultats suffisamment approchés. J'ai repris ces recherches en employant des méthodes variées et plus exactes ; les détails de ces expériences sont renfermés dans une note placée à la fin de la troisième édition de cet ouvrage ; ici je me bornerai à un aperçu de ces méthodes et à l'énoncé des résultats obtenus.

960. Dans la première méthode que j'ai employée, le corps mauvais conducteur était renfermé entre des sphères de cuivre mince ; la sphère intérieure était pleine d'eau chaude constamment agitée, et la sphère extérieure était plongée dans un bain renfermant un grand volume d'eau à la température ordinaire, constamment agitée, très-près de la surface de la sphère. Il résulte du calcul que, pour certaines relations entre les températures des différents points de l'enveloppe sphérique au commencement des expériences, et auxquelles satisfont les corps qui ne sont pas trop mauvais conducteurs, le refroidissement de l'eau chaude suit la loi de Newton ; et on peut facilement déduire le coefficient de conductibilité de celui du refroi-

dissement. Pour le sable quartzeux, la poudre de bois d'acajou et la colle d'amidon, la vitesse du refroidissement suivait exactement la loi indiquée, et j'ai pu obtenir la valeur de la conductibilité de ces

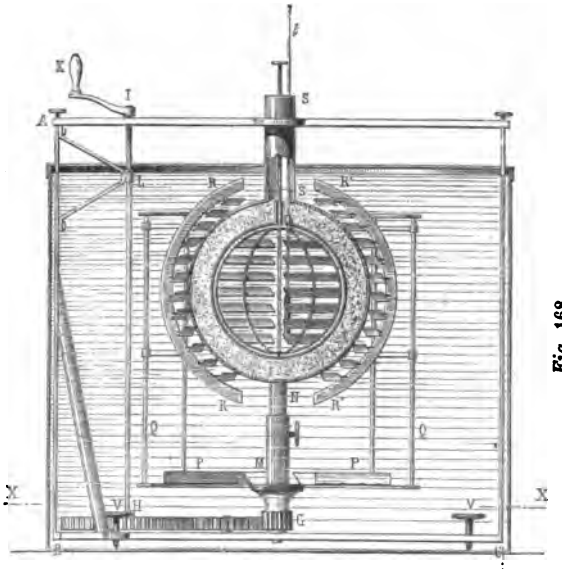


Fig. 168.

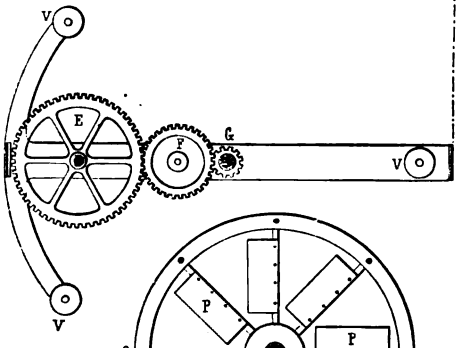


Fig. 169.

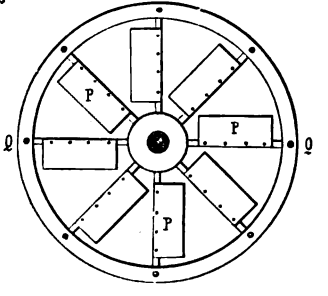


Fig. 170.

matières. Mais, pour le coton et les charbons en poudre, le refroidissement suivait une loi plus rapide, et les expériences n'ont conduit à rien de certain ; seulement, pour le coton, la vitesse du refroidissement, dans les mêmes circonstances, ayant été sensiblement la même

pour des densités comprises entre 0,0077, et 0,076, j'ai dû en conclure que la conductibilité du coton est indépendante de sa densité, et par conséquent que la conductibilité de la fibre ligneuse est égale à celle de l'air stagnant.

961. La figure 168 représente une coupe verticale de l'appareil. ABCD est un cadre en cuivre qui se place dans une cuve en fer plombée, pleine d'eau à la température ordinaire. Sur la barre inférieure BC se trouvent trois roues dentées horizontales E, F, G (*fig.* 169); la première E reçoit un mouvement de rotation par la tige verticale HI, fixée par la partie inférieure au centre de la roue et munie à sa partie supérieure de la manivelle K; L est une douille destinée à maintenir la tige. La roue G est percée au centre d'une ouverture circulaire à travers laquelle passe la douille fixe M, dans laquelle s'engage la tige N, soudée à la surface de la sphère extérieure, et qui est destinée à la soutenir. La roue G porte un cercle horizontal (*fig.* 170) à huit rayons, garnis chacun d'une plaque de cuivre P inclinée à 45°; à sa circonférence se trouvent huit tiges verticales Q, Q, reliées entre elles à la partie supérieure par un autre cercle horizontal; sur chacune de ces tiges on fixe avec des vis des portions de cercle RR, RR', garnies d'un grand nombre de petites plaques de cuivre inclinées, dont les côtés sont très-rapprochés de la surface extérieure de l'enveloppe sphérique. SS est un cylindre en cuivre mastiqué à la partie supérieure de l'enveloppe extérieure; il recouvre trois douilles qui communiquent avec la sphère intérieure; dans l'une passe la tige du thermomètre, dans une autre la tige de l'agitateur, et la troisième, ordinairement fermée, peut recevoir un bouchon qui porte les tubes destinés à remplir le vase intérieur quand le niveau de l'eau a baissé. La surface extérieure de la petite sphère et la surface intérieure de la grande sphère sont couvertes de noir de fumée. La surface de la sphère extérieure est composée de deux parties qui se réunissent par emboîtement; le joint est rendu étanche avec de la cire. Des thermomètres, qui ne sont pas indiqués dans les figures, donnaient la température de l'eau du bain. Pendant toute la durée de l'expérience, l'eau intérieure était agitée par une disposition analogue à celle qui a été employée dans les expériences sur le refroidissement (899), et l'eau extérieure au moyen de la manivelle K. La vitesse du refroidissement se mesurait comme dans les expériences sur le refroidissement dans l'air, et en faisant de la même manière les corrections relatives à l'eau qu'on introduisait dans le vase, avant chaque observation, pour le maintenir plein.

962. Dans la seconde méthode, je me suis servi d'une enveloppe cylindrique, formée du corps dont je voulais déterminer la conductibilité ; elle était chauffée intérieurement par la vapeur, et sa surface était exposée à l'air dans l'enveloppe à température constante, employée pour les expériences sur le refroidissement dans l'air. Lorsque le régime est établi, la quantité de chaleur qui traverse l'enveloppe est évidemment égale à celle qui s'échappe par sa surface ; or, il existe une relation très-simple entre les rayons des cylindres de l'enveloppe, la température de la vapeur, celle de la surface extérieure de l'enveloppe, celle de l'air environnant, le coefficient de refroidissement de la surface extérieure, et la conductibilité de la matière de l'enveloppe. Toutes ces quantités peuvent être mesurées facilement, excepté la température de la surface de l'enveloppe. Nous verrons bientôt comment elle a été déterminée.

963. La figure 171 représente la disposition générale de l'appareil.

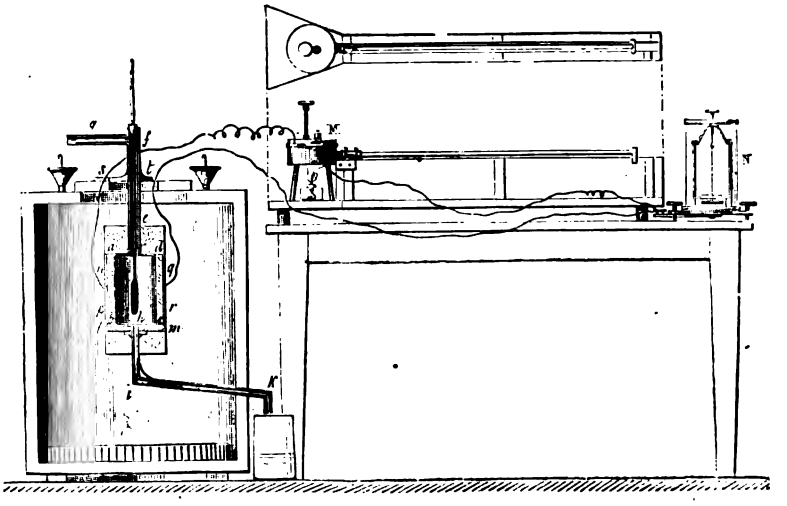


Fig. 171.

Pour les matières pulvérulentes, je me servais d'un cylindre *abcd* de $0^m,20$ de hauteur et d'un diamètre variable, couvert de papier ; il était surmonté d'un tube *ef* fermé en dessus par un bouchon à travers lequel passait la tige d'un thermomètre dont le 100° degré dépassait de fort peu la surface supérieure du bouchon ; ce tube était garni latéralement d'un tuyau *fg* communiquant avec un vase produisant de la vapeur ; à sa partie inférieure, le vase était soudé à un tuyau *hik*, coudé en *i*, destiné à faire écouler l'eau provenant de la

vapeur condensée et la vapeur en excès. A 2 centimètres au-dessous du cylindre *abcd*, le tube *hi* était garni de trois tiges horizontales en fer, de $0^m,02$ de largeur, destinées à soutenir un plateau de bois *lm*, qu'on introduisait en enlevant le tube horizontal *ik*, et en faisant passer les tiges du tube à travers des fentes correspondantes pratiquées dans le plateau : par un petit mouvement de rotation, le plateau se trouvait soutenu. Avant son introduction, on avait fixé sur la partie supérieure du plateau un cylindre de verre *nprq* très-mince, ouvert par les deux bouts, de même diamètre que le plateau, et maintenu au moyen d'une bande de papier collée à la fois sur le verre et sur le bois. Le cylindre de verre était recouvert de papier blanc sur toute sa surface, et la feuille de papier dépassait ses deux extrémités à peu près de $0^m,10$. La matière qui devait être soumise à l'expérience était placée entre les deux cylindres *abcd* et *nprq*, et on remplissait de coton cardé le cylindre de papier qui formait les deux prolongements du cylindre de verre. L'appareil que nous venons de décrire était suspendu dans la chambre à température constante, qui a été employée dans les expériences sur le refroidissement, au moyen des tiges *s*, *t* qui s'appuyaient sur les bords de l'orifice de la chambre. On faisait passer de la vapeur dans le cylindre de fer-blanc, souvent pendant plusieurs heures, afin d'être bien assuré que le régime était établi.

964. La température de la surface du cylindre a été obtenue de la manière suivante : un ruban de fer très-mince, de $0^m,01$ de largeur et de 2 m. de longueur, était soudé par ses deux extrémités à deux rubans de cuivre rouge de mêmes dimensions ; l'une des soudures et les parties adjacentes du ruban étaient appliquées contre le cylindre de verre, l'autre sur la surface d'un vase cylindrique M, renfermant de l'eau dont on pouvait facilement faire varier la température, et qui contenait un agitateur et un thermomètre ; enfin, les deux extrémités libres des rubans de cuivre pouvaient être mises en communication avec un rhéomètre très-sensible N. Lorsqu'on voulait mesurer la température de la surface du cylindre, on fermait le circuit et on élevait la température de l'eau du vase, jusqu'à ce que l'aiguille du rhéomètre revînt au zéro ; à cet instant les deux soudures étaient à la même température, et par conséquent celle de la surface du cylindre était égale à celle de l'eau du vase. Pour fixer les soudures à la surface des deux cylindres, on employait une tresse de coton de $0^m,02$ de largeur, qui enveloppait le ruban métallique et le pressait sur une très-grande partie de la circonférence du cylindre ; le ruban était

maintenu serré par une boucle, et les extrémités libres du ruban sortaient par des fentes pratiquées dans la tresse. Le thermomètre destiné à indiquer la température de l'eau renfermée dans le vase, dont la surface était en contact avec la seconde soudure du circuit, était placé horizontalement afin de rendre la lecture plus facile ; sa tige était protégée par une planche verticale placée au-dessous ; on pouvait facilement estimer 0,02 de degré ; le vase était chauffé par une lampe à alcool. Le rhéomètre construit par M. Ruhmkorff était assez sensible pour indiquer un vingtième de degré de différence entre les deux soudures.

965. Le cylindre de verre environnant était sans influence, à cause de sa faible épaisseur et de la grande conductibilité du vase. J'ai aussi employé une enveloppe de papier collée sur trois cylindres de fer-blanc de même axe et de mêmes rayons, de $0^m,01$ de hauteur, maintenus par deux tiges étroites de fer-blanc (*fig.* 172) ; la bande de fer-blanc permettait de serrer le ruban métallique destiné à mesurer la température de la surface du cylindre. Cette méthode a donné les mêmes résultats que le cylindre de verre.

Fig. 172.

966. Pour les corps solides, tels que les pierres, les marbres, j'ai employé des cylindres creux, peints à l'huile intérieurement et recouverts de papier sur la surface extérieure ; le plus souvent, pour être mieux assuré que l'eau ne pouvait pas pénétrer la matière, la surface extérieure était recouverte d'une feuille d'étain fixée avec de la colle de fécule. Les cylindres étaient fermés à chaque extrémité par une lame de caoutchouc, puis par un disque de bois ; pour les cylindres de bois, comme pour ceux de fer-blanc, la vapeur arrivait par la partie supérieure, et s'écoulait par le bas. Ils étaient soutenus par la partie inférieure, et isolés par les deux bouts au moyen de cylindres de papier remplis de coton (*fig.* 173). Pour les bois, j'ai employé la même disposition, lorsqu'il s'agissait d'observer la conductibilité perpendiculairement aux fibres ; mais, pour l'observer parallèlement, j'ai employé des portions de cylindres dont les surfaces étaient perpendiculaires aux fibres, elles étaient fortement comprimées contre le cylindre de fer-blanc couvert de papier, qui avait pour rayon celui du cylindre intérieur des enveloppes de bois.

Fig. 173. *Fig.* 174.

967. Quant aux papiers et aux étoffes, on les enroulait contre un

cylindre de fer-blanc, toujours couvert de papier, et on les maintenait par une bande de papier fort, ayant une hauteur double de celle du cylindre, et qui était maintenue elle-même par le ruban métallique et la tresse qui l'enveloppait (*fig.* 174).

968. La formule qui donne la conductibilité est la suivante :

$$C = \frac{QR'm(t'' - t''')(\log R' - \log R)}{t' - t''}.$$

Dans cette formule, C est la conductibilité de la matière ; R, R' les rayons des cylindres intérieur et extérieur ; $m = 2{,}3025$; t', t'', t''', les températures de la vapeur, de la surface extérieure de l'enveloppe et de l'air ; Q représente le coefficient d'émission de la chaleur et est égal à la somme K + K' (908), chacune des valeurs de K et de K' étant multipliée par le coefficient correspondant à la température de la surface (913, 921).

969. Enfin, dans le dernier mode d'expérience, j'employais des plaques rectangulaires verticales, isolées sur leur pourtour ; une des faces était échauffée par la vapeur, et l'autre était exposée à l'air libre d'une chambre à température constante. Une formule plus simple encore que pour les cylindres permettait de déduire des mêmes éléments la conductibilité de la matière ; mais, pour mesurer la température de la surface libre, j'ai employé une autre méthode beaucoup plus exacte. En face de la plaque chauffée, se trouvait un vase plein d'eau de même forme ; les surfaces en regard étaient couvertes de papier, et à la même distance de ces surfaces se trouvaient les pôles d'une pile thermo-électrique, communiquant avec un rhéomètre très-sensible ; il est évident que la température de la face libre était égale à celle de l'eau du vase quand l'aiguille du rhéomètre était au zéro.

970. La figure 175 représente l'appareil vu en dessus ; les figures 176 et 177, les élévations des deux longues faces ; la figure 178, une coupe verticale perpendiculaire aux deux élévations. Dans toutes ces figures, les mêmes lettres indiquent les mêmes objets. ABCD (*fig.* 175) est une caisse rectangulaire en tôle plombée, fermée de toutes parts et pleine d'eau ; elle est environnée d'une caisse en bois XXXX ; les fonds et les petites faces de ces deux caisses sont séparés par un intervalle de $0^m{,}06$, les grandes faces de la caisse de tôle ne sont qu'en partie couvertes de bois. Les espaces AXXC et BXXD, qui séparent les deux faces latérales de la caisse de tôle

de celle de bois, renferment un grand nombre de plaques de tôle verticales, soudées à la caisse de tôle ; elles ont pour objet de don-

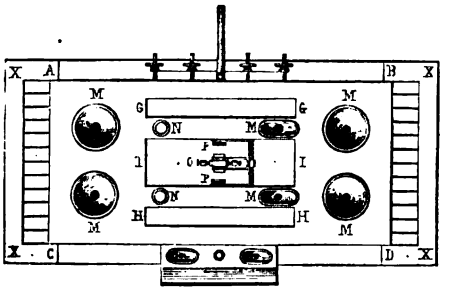


Fig. 175.

ner à l'air qui traverse les canaux AXXC et BXXD la température de

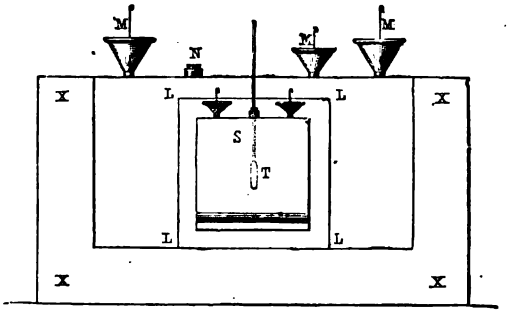


Fig. 176.

l'eau renfermée dans la caisse de tôle. GG et HH sont deux canaux

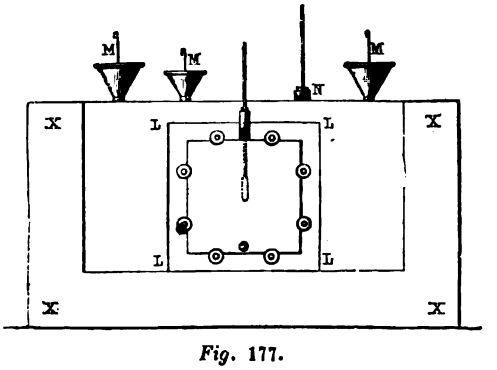


Fig. 177.

rectangulaires verticaux, qui traversent de part en part la caisse de

tôle et qui communiquent par le bas de la caisse avec les canaux AXXC et BXXD.

Il est un canal pratiqué dans la caisse de tôle, qui ne la traverse pas de part en part. K et K (*fig.* 178) sont deux tubes circulaires horizontaux, de même axe et de même diamètre, ouverts par les deux bouts. L, L, L, L sont des ouvertures rectangulaires, de $0^m,20$ de côté, percées dans les grandes faces de la caisse de tôle, qui s'ouvrent à l'extérieur et dans les canaux GG, HH; ces canaux, ces cylindres et ces ouvertures sont environnés d'eau. M, M, M, M sont des entonnoirs qui surmontent les tubulures par lesquelles passent les agitateurs. N, N sont des tubulures par lesquelles passent les tiges des thermomètres. O est une pile thermo-électrique fixée dans le canal II, dans l'axe commun des deux tubes K, K, et à égale distance de leurs extrémités voisines; ses pôles communiquent avec un rhéomètre très-sensible qui n'est point indiqué dans les figures. P, P sont des écrans solidaires doubles, mobiles autour des axes Q, Q, destinés à intercepter les rayons de chaleur qui arrivent à la pile par les ouvertures K, K. Les ouvertures rectangulaires L, L, L, L sont destinées à recevoir les corps, dont les surfaces en regard de la pile doivent agir sur elle; mais comme les surfaces voisines de la pile doivent toujours être à la même distance de ses extrémités, les bords internes des ouvertures L, L, L, L sont garnis de quatre petits arrêts R, R, R, R, contre lesquels les corps viennent s'appuyer; la figure 179, qui représente une des faces de la caisse, lorsque l'ouverture L, L, L, L est libre, montre la disposition de ces arrêts.

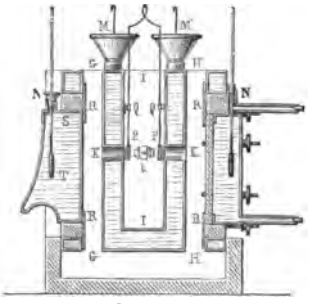


Fig. 178.

971. L'une des ouvertures L, L, L, L, est toujours occupée par un vase de cuivre ST (*fig.* 178) plein d'eau, garni de deux agitateurs et d'un thermomètre très-sensible; une partie de sa surface inférieure est disposée de manière qu'on puisse facilement la chauffer au moyen d'une lampe à alcool; ce vase est environné d'un cadre en bois de sapin, qui le sépare des bords de l'ouverture, dans lequel il est placé, afin d'éviter l'échauffement de l'eau de la caisse; ce vase est fixé dans sa position par de petits coins en bois.

972. Dans l'autre ouverture, on place les plaques dont on veut mesurer la conductibilité; elles s'appuient sur les arrêts R, R, R, R,

et sont chauffées sur l'autre face par la vapeur ; leurs dispositions sont différentes suivant que les matières sont solides ou pulvérulentes. Dans la figure 178, on a supposé qu'il s'agissait d'une matière solide ; la figure 180 représente à une plus grande échelle la disposition de l'appareil ; *abcd* est un vase rectangulaire en cuivre dont la face est percée d'une grande ouverture, comme on le voit dans les figures 181 et 182, qui représente la première, la face *ab*, la seconde, une coupe du vase perpendiculaire à cette face. Le vase re-

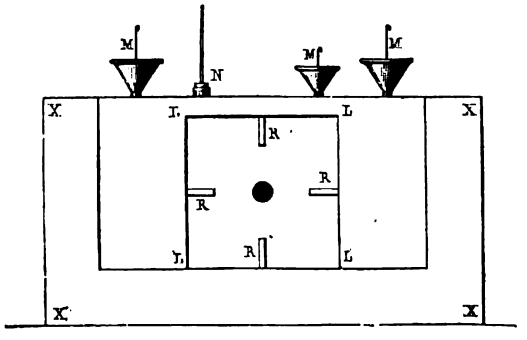


Fig. 179.

çoit la vapeur par le tube *ef*, et l'eau condensée, ainsi que la vapeur en excès, s'échappent par le tube *gh ;* une lame mince et étroite de caoutchouc est posée sur les bords de l'ouverture de la face *ab*, et, contre le caoutchouc, on pose la plaque, que l'on maintient serrée par des tiges de cuivre, terminées d'un côté par un crochet, et de l'autre par un filet de vis et un écrou ; le vase renferme un thermomètre qui donne la température de la vapeur, et il est environné d'un cadre en bois de sapin comme le vase à eau qui se trouve dans l'autre ouverture ; on le fixe de même par des coins en bois.

La figure 183 représente la disposition employée pour les matières pulvérulentes : toutes les faces du vase à vapeur sont pleines ; il est environné du cadre en bois qui doit l'isoler des bords de l'ouverture L, L, L, L, et le cadre est fermé par une lame mince de verre ou de fer-blanc recouverte de papier sur ses deux faces. Le papier extérieur sert à la fixer. La matière pulvérulente est placée entre le vase à vapeur et la lame mince.

973. La figure 185 est une projection horizontale de la pile thermo-électrique et de la disposition employée pour en régler la position. *abcd* est la pile, *e* et *f* sont deux appendices communiquant avec les

pôles, et auxquels sont fixés les fils qui communiquent avec le rhéomètre. La pile est soutenue par deux tiges *g*, *h*, fixées à une boîte *ik*, traversée par une crémaillère *lm* qui engrène dans un pignon qu'on

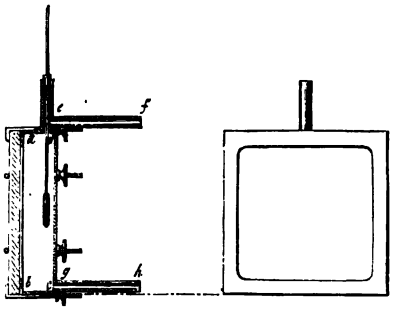


Fig. 180.

Fig. 181.

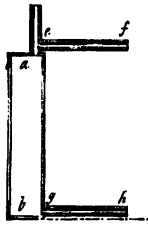


Fig. 182.

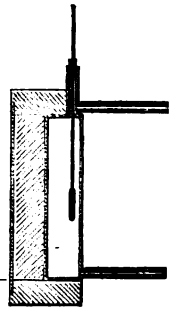


Fig. 183.

peut faire tourner avec une clef. Par cette disposition, on peut amener la boîte au point convenable quand les deux faces qui rayonnent sur ses extrémités sont les mêmes et ont la même température. Pour qu'on puisse fixer la crémaillère, elle porte à ses extrémités deux tiges *p*, *n*, qui se terminent chacune par un cercle taraudé intérieurement *q*, *r*; on visse dans ces cercles des cylindres qui passent dans les ouvertures K, K (*fig.* 180), et ces derniers sont maintenus en place par des cales en bois.

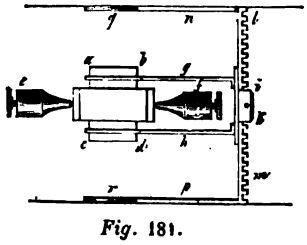


Fig. 181.

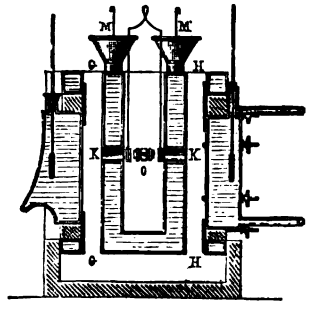


Fig. 185.

974. La figure 185 représente la disposition qui a été employée pour déterminer les rapports des pouvoirs rayonnants des corps et dont il a été question. Dans les ouvertures L, L, L, L, de l'appareil précédent se trouvent deux vases de cuivre ; l'un est chauffé par la vapeur, l'autre renferme de l'eau dont on peut élever la température à un degré convenable ; les surfaces des vases sont recouvertes des

matières dont on veut mesurer les pouvoirs rayonnants, celui qui rayonne le moins étant du côté de la vapeur. Pour le verre, j'ai employé la disposition de la figure 178; l'ouverture du vase était fermée par une lame mince de verre retenue par les moyens indiqués précédemment pour des plaques épaisses.

975. En égalant, comme dans les autres méthodes, la quantité de chaleur qui traverse la plaque à celle qui est émise par la surface libre, on arrive à la formule très-simple :

$$C = \frac{eQ(t' - t'')}{t - t'},$$

C étant la conductibilité de la matière ; e l'épaisseur de la plaque ; K la valeur de K + K′ modifiée par les coefficients correspondant à la température de la surface (923, 931) ; t, t', t'' étant les températures de la vapeur, de la surface extérieure de la plaque, et de l'air environnant.

976. Les tableaux suivants renferment, pour un certain nombre de corps, les valeurs de C, déduites des expériences que je viens de décrire.

Ces nombres représentent les quantités de chaleur qui traverseraient dans une heure une plaque de la matière ayant 1 mètre carré de surface, 1 mètre d'épaisseur, les deux faces ayant des températures qui diffèrent de 1 degré.

MATIÈRES CONTINUES, OU DONT LES PARTIES SONT AGGLOMÉRÉES.

Charbon des cornues à gaz.....	$d = 1{,}61$	$C = 4{,}96$
Marbre gris à grains fins.....	$d = 2{,}68$	$C = 3{,}48$
— blanc saccharoïde à gros grains.....	$d = 2{,}77$	$C = 2{,}78$
Pierre calcaire à grains fins.....	$d = 2{,}34$	$C = 2{,}08$
— —	$d = 2{,}27$	$C = 1{,}69$
— —	$d = 2{,}17$	$C = 1{,}70$
Pierre de liais à bâtir à gros grains.....	$d = 2{,}24$	$C = 1{,}32$
— — —	$d = 2{,}22$	$C = 1{,}27$
Plâtre ordinaire gâché.....	$d =$ »	$C = 0{,}331$
— — très-fin, gâché.....	$d = 1{,}25$	$C = 0{,}520$
— de moulage — —	$d = 1{,}25$	$C = 0{,}44$
— aluné, gâché.....	$d = 1{,}73$	$C = 0{,}63$
Terre cuite.....	$d = 1{,}98$	$C = 0{,}69$
—	$d = 1{,}85$	$C = 0{,}51$
Bois de sapin, transmission perpendiculaire aux fibres.....	$d = 0{,}48$	$C = 0{,}093$
Bois de sapin, transmission parallèle aux fibres....	»	$C = 0{,}170$

Bois de noyer, transmission perpendiculaire aux fibres	$d = $ »	$C = 0{,}103$
Bois de noyer, transmission parallèle aux fibres		$C = 0{,}174$
Bois de chêne, transmission perpendiculaire aux fibres		$C = 0{,}211$
Liége	$d = 0{,}22$	$C = 0{,}143$
Caoutchouc	$d = $ »	$C = 0{,}170$
Gutta-percha	$d = $ »	$C = 0{,}172$
Colle d'amidon	$d = 1{,}017$	$C = 0{,}425$
Verre	$d = 2{,}44$	$C = 0{,}75$
—	$d = 2{,}55$	$C = 0{,}88$

MATIÈRES PULVÉRULENTES.

Sable quartzeux	$d = 1{,}47$	$C = 0{,}27$
Brique pilée, gros grains	$d = 1{,}0$	$C = 0{,}139$
— passée au tamis de soie	$d = 1{,}76$	$C = 0{,}165$
Brique en poudre fine obtenue par décantation	$d = 1{,}55$	$C = 0{,}140$
Craie en poudre un peu humide	$d = 0{,}92$	$C = 0{,}108$
— — lavée et séchée	$d = 0{,}85$	$C = 0{,}086$
— — lavée, séchée et comprimée	$d = 1{,}02$	$C = 0{,}103$
Fécule de pommes de terre	$d = 0{,}71$	$C = 0{,}098$
Cendres de bois	$d = 0{,}45$	$C = 0{,}06$
Poudre de bois d'acajou	$d = 0{,}31$	$C = 0{,}065$
Charbon de bois ordinaire en poudre	$d = 0{,}49$	$C = 0{,}079$
Braise de boulanger en poudre passée au tamis de soie	$d = 0{,}25$	$C = 0{,}068$
Charbon de bois ordinaire en poudre passée au tamis de soie	$d = 0{,}41$	$C = 0{,}081$
Coke pulvérisé	$d = 0{,}77$	$C = 0{,}160$
Limaille de fer	$d = 2{,}05$	$C = 0{,}158$
Bi-oxyde de manganèse	$d = 1{,}46$	$C = 0{,}163$

MATIÈRES FILAMENTEUSES.

Coton en laine, quelle que soit sa densité		$C = 0{,}040$
Molleton de coton, —		$C = 0{,}040$
Calicot neuf, —		$C = 0{,}050$
Laine cardée, —		$C = 0{,}044$
Molleton de laine, —		$C = 0{,}024$
Édredon, —		$C = 0{,}039$
Toile de chanvre neuve	$d = 0{,}54$	$C = 0{,}052$
— — vieille	$d = 0{,}58$	$C = 0{,}043$
Papier blanc à écrire	$d = 0{,}85$	$C = 0{,}043$
— gris non collé	$d = 0{,}48$	$C = 0{,}034$

977. Il est important de remarquer que, la conductibilité des matières textiles étant sensiblement indépendante de leur densité, il

s'ensuit nécessairement que leur conductibilité est la même que celle de l'air stagnant. La valeur de C relative à la colle d'amidon peut aussi être regardée comme égale à celle de l'eau stagnante. J'ai encore reconnu que, pour les matières qui conduisent mal la chaleur, l'humidité augmente beaucoup leur faculté conductrice.

CHAPITRE III

Considérations générales et applications des formules.

978. Nous avons vu précédemment (943) qu'en désignant par M la quantité de chaleur qui traverse dans l'unité de temps une plaque, à faces parallèles, ayant l'unité de surface, et dont les faces sont maintenues à des températures constantes t et t', on a

$$M = \frac{C(t-t')}{e} = (t-t') : \frac{e}{C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (a)$$

Dans cette expression, e représente l'épaisseur de la plaque et C la conductibilité, c'est-à-dire la valeur de M pour $t - t' = 1$ et $e = 1$.

979. Si le corps était formé de deux plaques superposées, ayant des épaisseurs e et e', et des conductibilités C et C', en désignant par θ la température commune des faces en contact, on a évidemment, quand le régime est établi :

$$M = \frac{C(t-\theta)}{e} \quad \text{et} \quad M = \frac{C'(\theta - t')}{e'}.$$

En éliminant θ entre ces deux équations, on trouve

$$M = (t-t') : \left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'}\right).$$

On trouverait de même pour un nombre quelconque de plaques

$$M = (t-t') : \left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'} + \frac{e''}{C''} + \frac{e'''}{C'''} + \ldots\ldots\right) \quad \ldots\ldots\ldots (b)$$

980. Au moyen des tableaux (976) et des formules précédentes, on peut facilement calculer les quantités de chaleur transmises par les plaques, lorsqu'on connaît les températures de leurs surfaces. Mais ces

températures ne sont jamais connues exactement, et on ne pourrait les mesurer que par des expériences très-délicates, impossibles en pratique ; et d'ailleurs, dans l'établissement des projets, il faut avoir au moins une valeur approchée des quantités de chaleur transmises en fonction des températures de l'air qui se trouve en dehors des surfaces.

981. Considérons d'abord une enceinte fermée par des murailles, dont une seule est exposée à l'air extérieur, et qui est maintenue intérieurement à une température T, la température de l'air extérieur étant θ. Le régime une fois établi, la quantité de chaleur qui traversera la muraille exposée à l'air sera évidemment égale à celle qui pénétrera dans le même temps dans la muraille par sa surface intérieure, et à celle qui sortira dans le même temps par sa surface extérieure; la surface intérieure sera à une température t, inférieure à T, et la surface extérieure sera à la température t' supérieure à θ. On peut admettre que le réchauffement de la surface intérieure et le refroidissement de la surface extérieure s'effectuent suivant les mêmes lois. Alors, en désignant par M la quantité de chaleur transmise par mètre carré et par heure, on aurait trois expressions de M : l'une en fonction de la conductibilité C de la matière de la muraille, les deux autres en fonction des coefficients K et K′ de refroidissement par le rayonnement et le contact de l'air, équations d'où l'on pourrait déduire les valeurs de t et de t' en fonctions de quantités connues ; mais, si on employait les formules de refroidissement de Dulong (911, 914), le calcul serait impossible, et même, en admettant les formules plus simples (906, 907), on serait conduit à une équation du second degré assez compliquée et d'un usage fort difficile ; il vaut mieux admettre pour le réchauffement et le refroidissement la loi de Newton (908), qui est d'une exactitude suffisante pour de faibles excès de température, d'autant plus que, dans tous les calculs relatifs à la transmission de la chaleur, on ne peut jamais espérer qu'une approximation un peu grossière parce qu'il y a des circonstances dont il est impossible de tenir compte, comme l'accroissement de température des points de la surface extérieure à mesure qu'ils sont plus élevés, l'action des vents, celle du soleil, etc. D'après cela, nous aurons

$$M = \frac{C(t - t')}{e}; \quad M = Q(T - t); \quad M = Q(t' - \theta);$$

équations qui donnent

$$t = \frac{T(C + Qe) + C\theta}{2C + Qe}; \quad t' = \frac{\theta(C + Qe) + TC}{2C + Qe}; \quad \text{et} \quad M = \frac{C(QT - \theta)}{2C + Qe}. \quad (a)$$

982. Il résulte de cette dernière formule plusieurs conséquences importantes. Si Qe était très-petit relativement à 2C et pouvait être négligé, la formule se réduirait à $M = Q(T - \theta) : 2$, et la valeur de M serait indépendante de C et de e, c'est-à-dire de la nature du corps et de son épaisseur. Cette circonstance peut se présenter quand la valeur de e est très-petite relativement à celle de C.

Considérons, par exemple, le plomb, qui est le métal le plus mauvais conducteur, et pour lequel $C = 14$; en supposant que les surfaces de la plaque soient ternes, Q sera à peu près égal à 6, et pour des épaisseurs de $0^m,01$; $0^m,02$; $0^m,03$, les valeurs de $2C + Qe$ seront $28 + 0,06$; $28 + 0,12$; $28 + 0,18$, qui diffèrent bien peu les unes des autres. Il en serait, à plus forte raison, de même pour les autres métaux. Si l'on suppose qu'une plaque de matière filamenteuse, pour laquelle la plus petite valeur de C est 0,04, ait $0^m,0001$ d'épaisseur, ce qui est à peu près celle d'une feuille de papier, la valeur de $2C + Qe$ sera égale à $0,08 + 0,0006$; le second terme, étant petit relativement au premier, pourra encore être négligé, et la valeur de M serait la même que précédemment. Ainsi, une feuille de papier transmet autant de chaleur qu'une lame métallique dont l'épaisseur peut varier dans des limites fort étendues.

Pareille chose a lieu pour des plaques de verre de plusieurs millimètres d'épaisseur, car pour le verre $C = 0,75$; $Q = 2,91 + 2,20 = 5,10$, et $2C + Qe = 1,50 + 5,10e$, et pour des épaisseurs de 0^m, 001 ; 0,002 ; 0,003, cette dernière expression devient $1,5 + 0,0102$; $1,5 + 0,01503$.

983. Si l'on supposait C très-petit et l'épaisseur e assez grande pour que 2C pût être négligé par rapport à Qe, la valeur de M se réduirait à $C(T - \theta) : e$; elle serait, par conséquent, indépendante de l'état de la surface, et en raison inverse de e ; mais, comme la valeur de C n'est jamais inférieure à Q pour les corps non métalliques, il faudrait, même pour les corps les plus mauvais conducteurs, que l'épaisseur fût très-grande. Par exemple, pour des matières filamenteuses, avec $e = 0^m,50$, on aurait $2C + Qe = 0,08 + 6.\ 0,5 = 0,08 + 3$.

984. Si l'on avait deux murs juxtaposés, en admettant qu'il n'y ait pas de variations brusques de température dans le passage de la

chaleur du premier au second, ce qui est d'ailleurs confirmé par l'expérience, et en désignant par x la température à la jonction des deux murs, par e et e' leurs épaisseurs et par C et C′ leurs conductibilités, on aura, après l'établissement du régime,

$$M = \frac{C(t-x)}{e}; \quad M = \frac{C'(x-t')}{e'}; \quad M = Q(T-t); \quad M = Q(t'-\theta),$$

équations qui donnent

$$M = \frac{Q(T-\theta)}{2 + Q\left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'}\right)}.$$

On trouverait de même pour un nombre quelconque de murs dont les épaisseurs seraient e, e', e'', e''', et les conductibilités C, C′, C″, C‴..., .

$$M = \frac{Q(T-\theta)}{2 + Q\left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'} + \frac{e''}{C''} + \frac{e'''}{C'''} \ldots\right)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (b)$$

985. Pour faire comprendre l'usage de ces formules, nous appliquerons les premières (a) (981) à un cas particulier. Nous supposerons un mur de 10 m. de hauteur, formé de pierres calcaires, ayant une conductibilité égale à 1,70; les coefficients K et K′ étant : 3,60 (913) et 1,96 (922), nous aurons $Q = K + K' = 5{,}56$; nous supposerons $T = 15°$, et $\theta = 6°$; la valeur de T est la température ordinaire des lieux habités, et celle de θ est à peu près la valeur moyenne de la température extérieure à Paris pendant les sept mois de chauffage. Avec ces nombres, en prenant successivement pour e,

0m,10	0m,20	0m,30	0m,40	0m,50	0m,60	0m,70	0m,80	0m,90	1m,00

les formules (a) donnent pour t les valeurs suivantes :

11°,15	11°,61	12°,00	12°,31	12°,56	12°,77	12°,96	13°,11	13°,24	13°,29

pour t'

10°	9°,66	9°,38	9°,16	8°,99	8°,83	8°,71	8°,60	8°,50	8°,37

et pour M

25,40	22,25	19,84	17,85	16,23	14,95	13,81	12,84	12,00	11,20.

986. Les formules qui précèdent ne sont applicables à la trans-

mission de la chaleur à travers une muraille exposée à l'air libre, qu'autant que toutes les autres surfaces de la pièce peuvent être considérées comme ayant sensiblement la température de l'enceinte, ce qui ne peut à peu près exister que quand la première muraille est seule exposée au refroidissement extérieur. Quand toutes les murailles de la pièce sont exposées à l'air extérieur, toutes les surfaces intérieures sont à des températures peu différentes et inférieures à celle de l'air, et par conséquent, pour la même température de l'air intérieur, la quantité de chaleur transmise, dans les mêmes circonstances, par mètre carré et par heure, est plus petite que dans le premier cas. C'est ce qui arrive pour les pavillons isolés ne formant qu'une seule pièce à chaque étage, et pour les églises.

987. Dans le cas où toutes les murailles de la pièce sont exposées à l'air extérieur, le réchauffement des surfaces intérieures des murailles a lieu seulement par les mouvements de l'air, parce que, les surfaces intérieures étant à la même température, leur rayonnement réciproque est sans influence; alors, en conservant les notations précédentes, on aura

$$M = \frac{C(t-t')}{e}; \quad M = Q(t'-\theta); \quad M = K'(T-t); \quad \text{et} \quad Q = K + K',$$

équations qui donnent

$$t = \frac{Q(eK'T + C\theta) + CK'T}{C(Q+K') + QeK'}; \quad t' = \frac{Q(eK'\theta + C\theta) + CK'T}{C(Q+K') + QeK'};$$

$$M = \frac{K'CQ(T-\theta}{C(Q+K') + QeK}.$$

988. Si le mur était formé de deux murs juxtaposés ayant des épaisseurs e et e', des conductibilités C et C', on aurait

$$M = \frac{C(t-x)}{e}; \quad M = \frac{C'(x-t')}{e'}; \quad M = Q(t'-\theta); \quad \text{et} \quad M = K'(T-t);$$

et par suite

$$M = \frac{K'Q(T-\theta)}{Q + K + K'Q\left(\frac{e}{C} = \frac{e'}{C'}\right)}.$$

S'il y avait un nombre quelconque de murs, la formule générale serait

$$M = \frac{K'Q(T-\theta)}{Q + K' + K'Q\left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'} + \frac{e''}{C''} + \ldots\right)}.$$

En faisant comme précédemment $C = 1,70$; $K = 3,60$; $K' = 1,96$; $K + K' = 5,56$; $T = 15°$; $\theta = 6°$, on trouve, en supposant que e soit égal à

$0^m,10$	$0^m,20$	$0^m,30$	$0^m,40$	$0^m,50$	$0^m,60$	$0^m,70$	$0^m,80$	$0^m,90$	$1^m,00$

pour t les valeurs suivantes :

8°86	9°31	9°70	10°03	10°33	10°60	10°83	11°04	11°23	11°94

pour t'

8°16	8°00	7°86	7°74	7°64	7°55	7°46	7°39	7°32	7°26

et pour M

12,01	11,13	10,38	9,71	9,14	8,62	8,16	7,75	7,37	7,03

Il est utile de remarquer que si les murailles avaient une hauteur de 20 m., la perte par le contact de l'air serait 1,90 au lieu de 1,96, et on obtiendrait sensiblement les mêmes résultats.

989. Les valeurs de M que nous avons obtenues dans ce dernier cas sont plus petites que dans le premier ; ce résultat provient, comme je l'ai déjà dit, de ce que la température de la surface intérieure des murs est beaucoup plus basse.

990. Je ferai remarquer que, dans les deux cas que nous venons d'examiner, il faudrait prendre quelques précautions pour mesurer la température ; si le thermomètre était librement exposé à l'air, la température qu'il indiquerait serait celle de l'air, modifiée par le rayonnement de l'enceinte, et par conséquent il indiquerait une température inférieure à celle de l'air ; il faudrait nécessairement soustraire son réservoir au rayonnement de l'enceinte, en l'environnant de plusieurs enveloppes concentriques, ouvertes par les deux bouts, entre lesquelles on renouvellerait rapidement l'air. L'effet produit sur un thermomètre par l'abaissement de la température de la surface intérieure de l'enceinte se manifesterait évidemment sur les personnes qui se trouveraient dans l'enceinte, et, par conséquent, pour que la sensation de chaleur qu'elles éprouveraient restât la même, il faudrait nécessairement que la température de l'air augmentât à mesure que la température de la surface intérieure de l'enceinte s'abaisserait.

991. Les deux cas que nous avons considérés ne se rencontrent jamais exactement : dans le premier cas les surfaces intérieures des

murailles qui ne sont pas exposées à l'air extérieur n'ont jamais exactement la température de l'air, à cause de leur rayonnement sur les surfaces intérieures des autres murailles et des vitres ; dans le second cas, il y a toujours des parties de l'enceinte, les planchers et les plafonds, qui ne sont pas exposées au refroidissement extérieur, et souvent il s'y trouve des maçonneries intérieures, comme celles qui séparent les nefs des églises. Ces maçonneries sont chauffées par l'air et rayonnent sur les surfaces intérieures des murs extérieurs. Enfin, dans les deux cas, s'il y a un chauffage par des surfaces rayonnantes, par des poêles, des calorifères ou des tuyaux, les rayons de chaleur arrivent sur les surfaces intérieures de l'enceinte et en élèvent la température. Mais, comme nous le verrons plus loin, on peut considérer les effets produits dans les deux cas que nous avons supposés comme des limites extrêmes de ceux qui se rencontrent généralement dans la pratique.

992. *Murailles discontinues.* — Dans ce qui précède, nous avons supposé que les murailles étaient continues ; mais si elles étaient formées de murs à faces parallèles, séparés par des intervalles occupés par l'air, la quantité de chaleur transmise pourrait être beaucoup plus petite. En supposant que les intervalles soient assez larges pour que l'air puisse s'y mouvoir facilement, on peut admettre, sans crainte de s'éloigner beaucoup de la vérité, que la quantité de chaleur transmise à travers les espaces occupés par l'air est égale à $Q(x - x')$, x et x' étant les températures des faces en regard, tandis qu'elle serait représentée par $\frac{C}{e}(x - x')$, si cet espace était occupé par une matière ayant une conductibilité C et une épaisseur e : ainsi on obtiendra la valeur de M, dans les deux cas que nous avons considérés, en remplaçant dans les formules générales $\frac{e}{C}$ par $\frac{1}{Q}$. Alors la formule générale relative au premier cas, en supposant successivement 1 et 2 intervalles libres, deviendra

$$M = \frac{Q(T - \theta)}{2 + Q\left(\frac{e}{C} + \frac{1}{Q} + \frac{e'}{C'}\right)} \; ; \quad M = \frac{Q(T - \theta)}{2 + Q\left(\frac{e}{C} + \frac{1}{Q} + \frac{e'}{C'} + \frac{1}{Q} + \frac{e''}{C''}\right)}.$$

Si les murs étaient de même nature et de même épaisseur e et en nombre n, on aurait

$$M = \frac{Q(T - \theta)}{2 + \frac{nQe}{C} + n - 1}.$$

En supposant un mur continu de même épaisseur totale, la quantité de chaleur transmise M′ serait

$$M' = \frac{Q(T-\theta)}{2 + \frac{nQe}{C} + \frac{(n-1)Qe}{C}} = \frac{Q(t-\theta)}{2 + \frac{Qe}{C}\cdot(2n-1)}$$

et on aurait

$$\frac{M}{M'} = \frac{2 + \frac{Qe}{C}(2n-1)}{2 + \frac{nQe}{C} + n - 1}.$$

993. En supposant que les intervalles libres et les murs aient $0^m,02$ d'épaisseur et que les parties pleines soient en terre cuite, on aura $Q = 5,56$; $C = 0,60$, et le rapport précédent deviendra

$$\frac{M}{M'} = \frac{2 + 0,185(2n-1)}{2 + 0,185 \cdot n + n - 1}.$$

En faisant successivement n égal à

1	2	3	4	5	10

on trouve pour les rapports de M : M′

1	0,75	0,64	0,57	0,53	0,43

994. Il semble, au premier abord, qu'il y aurait de l'avantage à diminuer l'épaisseur des couches d'air, de manière à le rendre immobile ; mais alors il y aurait une transmission directe de la chaleur à travers l'air, et si l'épaisseur était trop petite, la transmission serait plus grande que quand l'air peut se mouvoir facilement. En effet, dans chaque intervalle plein d'air, la quantité de chaleur transmise est représentée par $(x - x')\left(K + \frac{0,04}{e}\right)$, et si l'on supposait $e = 0^m,02$, $\frac{0,04}{e}$ serait égal à 2, qui est à peu près la valeur de K′, et pour une valeur de e plus petite, le facteur de $(x - x')$ serait plus grand que Q.

Pour que des intervalles pleins d'air diminuent la transmission de la chaleur, il faut nécessairement que $\frac{e}{C}$ soit toujours plus petit que $\frac{1}{K + \frac{0,04}{e}}$; or, dans le cas dont il s'agit $C = 0,60$, $K = 2$, et pour des valeurs de e égales à

$0^m,0001$	$0^m,001$	$0^m,01$	$0^m,02$	$0^m,03$	$0^m,04$	$0^m,05$

les valeurs de $\frac{e}{C}$ sont

0,000166 0,00166 0,0166 0,0332 0,0492 0,0664 0,0830.

tandis que les valeurs de $\frac{1}{K + \frac{0,01}{e}}$ sont

0,0024 0,024 0,166 0,25 0,30 0,33 0,357.

On aurait évidemment les mêmes résultats pour des valeurs plus grandes de C; mais il n'en serait plus ainsi si la valeur de C était beaucoup plus petite; si, par exemple, elle était 10 fois plus petite et égale à 0,06, la valeur de $\frac{1}{K + \frac{0,04}{e}}$ ne l'emporterait sur celle de $\frac{e}{C}$ que jusqu'à une épaisseur de 0,01 ; au delà elle deviendrait plus petite.

On voit facilement, d'après ce que je viens de dire, que l'interposition des couches d'air serait surtout avantageuse si les surfaces libres en regard avaient un très-faible pouvoir rayonnant.

Il résulte de ce qui précède que les briques creuses doivent transmettre beaucoup moins de chaleur que les briques pleines de même épaisseur, ce qui est parfaitement confirmé par l'expérience.

995. On arriverait à des résultats analogues pour le second cas que nous avons examiné (987), en faisant les mêmes modifications à la formule générale relative à des murs juxtaposés de différente nature : il y aurait encore, comme dans le cas que nous venons d'examiner, diminution de transmission toutes les fois que $\frac{e}{C}$ serait plus grand que la transmission à travers la lame d'air augmentée du rayonnement des surfaces en regard.

996. Il est facile maintenant de trouver la quantité de chaleur perdue par un vase entouré d'enveloppes très-rapprochées. Ainsi, en supposant une seule enveloppe et en désignant par t et t' les températures des deux surfaces, on a

$$\left.\begin{aligned} M &= (t - t')\left(K + \frac{C}{e}\right) \\ M &= (t' - t'')\,(K_1 + K') \end{aligned}\right\}, \quad \text{d'où} \quad M = (K_1 + K')\,(t - t'')\left\{\frac{K + \frac{C}{e}}{K + \frac{C}{e} + (K_1 + K')}\right\}.$$

En supposant deux enveloppes et en désignant par θ la tempéra-

ture de la seconde surface, on a

$$\left.\begin{aligned} M &= (t-\theta)\left(K+\frac{C}{e}\right) \\ M &= (\theta-t')\left(K+\frac{C}{e}\right) \\ M &= (t'-t'')(K_1+K') \end{aligned}\right\}, \quad \text{d'où} \quad M = (K_1+K')(t-t'')\left\{\frac{K+\frac{C}{e}}{K+\frac{C}{e}+2(K_1+K')}\right\}.$$

En augmentant successivement d'une unité le nombre des enveloppes, on trouve que le coefficient de $(K_1 + K')$, au dénominateur de la fraction, augmente successivement de 1, et on est conduit à la formule générale

$$M = (K_1+K')(t-t'')\left\{\frac{K+\frac{C}{e}}{K+\frac{C}{e}+m(K_1+K')}\right\}$$

dans laquelle K représente le rayonnement des surfaces intérieures, K_1, celui de la surface extérieure, K' la quantité de chaleur prise à cette surface par le contact de l'air extérieur, C la conductibilité de l'air, e l'épaisseur des lames d'air, et m le nombre des enveloppes.

En supposant $K = K_1 = 3{,}77$; $K' = 3{,}85$; $C = 0{,}040$, et $e = 0^m{,}001$; pour les valeurs suivantes de m

0	1	2	3	4;

on trouve que les valeurs de M sont dans le rapport des nombres,

1	0,87	0,77	0,69	0,62.

Des expériences directes ont donné,

1	0,90	0,75	0,67	0,60.

Si l'on avait fait le vide entre les enveloppes, la transmission de la chaleur n'aurait lieu que par le rayonnement, et la quantité de chaleur transmise se déduirait évidemment de la formule précédente, en y faisant $C = 0$. Elle devient alors

$$M = \frac{(K_1+K')(t-t'')K}{K+m(K_1+K')}.$$

En supposant que les enveloppes soient en zinc, on aurait $K = K_1 = 0{,}24$; en les supposant au nombre de 10, et en prenant K' =

4, $t = 100$, $t' = 15$, on trouve $M = 2,11$. Pour comparer cette transmission à celle qui aurait lieu si l'intervalle qui sépare le corps de dernière enveloppe était occupé par de l'édredon, corps le plus mauvais conducteur, supposons que l'intervalle soit de $0^m,01$. La formule de la transmission de la chaleur à travers une plaque est $CQ(t - t') : (C + Qe)$, dans laquelle C est la conductibilité de la matière, qui pour l'édredon est 0,036, Q la perte de la chaleur par la surface extérieure qui est ici 4,24, et e l'épaisseur que nous avons supposée de $0^m,01$. Pour ces différentes valeurs numériques, on trouve que la quantité de la chaleur transmise est égale à 185, à peu près 90 fois plus grande qu'avec les enveloppes et le vide.

Le moyen que je viens d'indiquer pour diminuer la transmission de la chaleur est le plus efficace que je connaisse. Pour l'appliquer à deux cylindres métalliques concentriques, il faudrait fermer aux deux bouts l'intervalle qui les sépare par un corps mauvais conducteur, puis souder près d'une des extrémités un très-petit tuyau de plomb, qui servirait à faire le vide et que l'on fermerait ensuite en le comprimant et soudant son extrémité à la flamme d'un chalumeau. Cette disposition serait surtout avantageuse pour les appareils servant à faire de la glace.

997. *Transmission de la chaleur à travers les vitres.* — Pour la transmission de la chaleur à travers les vitres, nous examinerons deux cas extrêmes : d'abord, le premier dont il a été question pour la transmission de la chaleur à travers les murailles, et ensuite le cas d'une enceinte entièrement vitrée.

998. Supposons d'abord que les vitres soient placées dans une pièce dont une seule face soit exposée à l'air, les autres faces seront sensiblement à la température de l'air intérieur. Les rayons de chaleur obscure ne traversant pas le verre, les vitres s'échaufferont d'un côté par le rayonnement des surfaces intérieures et par le contact de l'air chaud, et se refroidiront de l'autre par des causes analogues. En admettant que le réchauffement et le refroidissement s'effectuent de la même manière, pour les mêmes excès de température, et en remarquant que, pour les petites épaisseurs des vitres, les quantités de chaleur transmises sont indépendantes de leur épaisseur, comme nous l'avons vu précédemment (982), on aura, en conservant les notations précédentes,

$$M = (T - x)Q; \quad M = (x - \theta)Q; \quad \text{d'où} \quad x = \frac{T + \theta}{2}, \quad \text{et} \quad M = \frac{T - \theta}{2}Q.$$

Pour des hauteurs de

1m	2m	3m	4m	5m

les valeurs de K′ (920) étant égales à

2,400	2,210	2,130	2,08	2,05

et le rayonnement du verre étant égal à 2,91, on trouve, pour ces différentes hauteurs et pour une différence de température de 1° entre T et θ, les valeurs suivantes de M

2,650	2,560	2,520	2,496	2,479

Le plus grand de ces nombres est plus petit que celui que j'avais trouvé autrefois par des expériences directes, parce que j'avais employé une vitre d'une plus petite hauteur, et que je n'avais pas pris toutes les précautions dont j'ai depuis reconnu la nécessité.

Si la température intérieure était de 15°, la température extérieure de 6°, celle des vitres serait de 10°,5, et les quantités de chaleur émises par mètre carré et par heure seraient, pour les hauteurs dont nous venons de parler, de

23,85	23,04	22,68	22,46	22,32

999. Considérons maintenant une enceinte entièrement vitrée, chauffée par l'air chaud, et faisons abstraction de l'effet produit par le sol. Les vitres ne seront échauffées que par l'air, parce que, toutes les surfaces étant à la même température, leur rayonnement réciproque ne produira aucun effet. On aura alors, en conservant les notations précédentes,

$$M = (T - x)K'; \qquad M = Q(x - \theta)$$

équations qui donnent

$$x = \frac{K'T + Q\theta}{Q + K'}; \quad \text{et} \quad M = \frac{QK'(T - \theta)}{Q + K'}.$$

On trouverait, comme dans le cas précédent, que, pour des hauteurs de

1m	2m	3m	4m	5m

les quantités de chaleur transmises par mètre carré et par heure, pour une différence de 1°, sont

1,65	1,54	1,49	1,47	1,45.

Pour une température intérieure de 15° et une température extérieure de 6°, les quantités de chaleur transmises sont

14,85 13,86 13 41 13,23 13,05.

Ces nombres sont plus petits que ceux que nous avons trouvés precédemment (998), parce que les vitres sont à une plus basse température.

1000. Les deux cas que nous venons d'examiner, comme ceux dont nous avons parlé à l'occasion de la transmission de la chaleur à travers les murailles, ne se rencontrent jamais exactement. Dans le premier cas, les surfaces des murs en face des vitres ont toujours une température inférieure à celle de l'air, et dans le second il y a toujours une partie de la surface de l'enceinte qui n'est pas vitrée; et, quand le chauffage a lieu en partie par le rayonnement des surfaces échauffées, les rayons qui arrivent directement sur les vitres augmentent la quantité de chaleur qu'elles transmettent. Mais, dans tous les cas, les quantités de chaleur réellement transmises sont comprises entre celles que nous avons calculées pour les deux cas extrêmes. Nous reviendrons sur cette question en parlant du chauffage des lieux habités.

1001. *Vitres multiples.* — S'il y avait plusieurs vitres parallèles, séparées par des intervalles suffisants pour que l'air pût s'y déplacer facilement, comme les deux faces de chaque vitre seraient sensiblement à la même température, on obtiendrait la valeur de M, dans le premier cas que nous avons considéré, en supposant nulles les épaisseurs e, e', e''... dans la formule générale (992). Alors pour 2, 3, 4..... n vitres, les valeurs de M seraient

$$\frac{Q(T-\theta)}{2+1};\quad \frac{Q(T-\theta)}{2+2};\quad \frac{Q(T-\theta)}{2+3};\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ \frac{Q(T-\theta)}{2+n-1};$$

et les rapports de ces valeurs à celle qui est relative à une seule vitre seraient

$$\frac{2}{3};\qquad \frac{1}{2};\qquad \frac{2}{5};\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ \frac{2}{1+n}.$$

Des rideaux plus ou moins épais produiraient sensiblement les mêmes effets. Si la distance des vitres était inférieure à 2 centimètres, la transmission serait augmentée, parce que la transmission par l'air, 0,04 : 0,02, est égale à la transmission par le contact de

l'air et son renouvellement, et qu'à des distances plus petites la transmission par l'air immobile serait plus grande.

Dans le cas d'une enceinte complétement vitrée, si on pouvait négliger la différence des surfaces, on retomberait dans le cas des enceintes multiples égales (932) ; mais il faudrait changer dans la formule Q en K', et $n+1$ en n, parce que, dans cette formule, n est le nombre total des surfaces, y compris celle du vase. Alors les quantités de chaleur transmises seraient en raison inverse du nombre des enveloppes. Mais c'est un cas tout à fait hypothétique, qui ne peut jamais se réaliser, ni relativement à la continuité des enceintes vitrées, ni relativement à l'égalité de leurs surfaces.

Dans le second cas que nous avons considéré pour les murailles, le calcul, relativement à la transmission de la chaleur à travers les vitres, serait très-compliqué, parce qu'il faudrait faire intervenir les surfaces des vitres, et on n'arriverait à rien de bien exact, à cause de l'influence des planchers et des plafonds, dont on ne peut pas tenir compte.

Le cas que nous avons examiné le premier, donne évidemment le maximum de transmission ; c'est le seul où l'on puisse calculer avec une suffisante exactitude la quantité de chaleur transmise par les vitres, et les nombres obtenus suffisent, dans tous les cas, pour obtenir une appréciation suffisante des quantités de chaleur perdues.

1002. *Transmission de la chaleur à travers des enveloppes cylindriques.* — Le cas que nous considérons maintenant est, par exemple, celui d'un tuyau métallique parcouru par de la vapeur, et environné de matières très-peu conductrices, afin de diminuer la perte de chaleur dans le trajet.

Désignons par M la quantité de chaleur transmise par unité de longueur, dans l'unité de temps, par R et R' les rayons des cylindres intérieur et extérieur, par t et t' leurs températures, et par θ la température extérieure. Quand le régime est établi, la quantité de chaleur qui traverse l'enveloppe est égale à celle qui traverse en même temps un élément annulaire infiniment mince de rayon r ; cette dernière étant égale à la surface $2\pi r$ de cet élément multipliée par la conductibilité C de la matière, par la différence de température dt de ses deux surfaces, et en raison inverse de leur distance dr, on aura

$$M = \frac{-2\pi r C dt}{dr}; \quad \text{d'où} \quad C dt = -\frac{M}{2\pi}\frac{dr}{r}.$$

Le signe — exprime que les variations de la température et du

rayon de l'enveloppe ont lieu en sens contraire. En intégrant la dernière équation entre les limites t et t' pour dt, et R et R' pour dr, il vient

$$C(t - t') = \frac{M}{2\pi} m(\log R' - \log R); \quad \text{et} \quad M = \frac{2\pi C(t - t')}{N},$$

m étant le module des tables de logarithmes, 2,3025, et N représentant m (log R' — log R).

Mais on a en même temps $M = 2\pi R'Q\,(t' - \theta)$; en éliminant t' entre ces deux équations, on trouve finalement

$$M = \frac{2\pi R'Q(t - \theta)}{1 + \frac{QR'N}{C}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (a)$$

S'il y avait deux enveloppes contiguës, en désignant par x la température de la seconde enveloppe, on aurait

$$C(t - x) = \frac{M}{2\pi} N; \quad C'(x - \theta) = \frac{M}{2\pi} N'; \quad \text{et} \quad M = 2\pi R''Q(t' - \theta),$$

équations, qui, par l'élimination de x, donnent

$$M = \frac{2\pi QR''(t - \theta)}{1 + QR''\left(\frac{N}{C} + \frac{N'}{C'}\right)}.$$

En répétant les calculs pour 3, 4... enveloppes, on serait conduit à la formule générale

$$M = \frac{2\pi QR^{(n)}(t - \theta)}{1 + QR^{(n)}\left(\frac{N}{C} + \frac{N'}{C'} + \frac{N''}{C''} + \ldots\ldots\right)}.$$

1003. Reprenons maintenant la formule relative à une seule enveloppe.

$$M = \frac{2\pi R'QC(t - \theta)}{C + QR'm(\log R' - \log R)} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (b)$$

Si nous supposons que la quantité C soit très-petite, par rapport à QR'N, la formule se réduira à $2\pi C\,(t - \theta) : m\,(\log R' - \log R)$, expression indépendante de Q et qui décroît à mesure que R' augmente : ainsi, dans ce cas, la transmission ne change pas avec l'état de la surface. Si, au contraire, la valeur de C était très-grande, par rap-

port au terme suivant, on aurait $M = 2\pi QR'(t - \theta)$, expression indépendante de C et qui croît proportionnellement à R'.

La première supposition se réaliserait pour une enveloppe de coton ou de laine ; la seconde, si l'on supposait que l'enveloppe eût une conductibilité presque métallique.

1004. Le rapport de cette valeur de M à la quantité de chaleur qui serait transmise, dans les mêmes circonstances, par le tuyau nu est évidemment égal à

$$\frac{C}{R} \cdot \frac{1}{C + QR'm(\log R' - \log R)}.$$

On voit, à l'inspection de cette dernière formule, qu'il n'y a pas toujours avantage, sous le rapport de la perte de chaleur, à couvrir un tuyau d'un corps, même mauvais conducteur, car cette expression n'est pas nécessairement plus petite que l'unité ; et pour la même valeur de C, elle varie avec R et R'. Il y a pour C certaines valeurs appartenant à des corps réputés mauvais conducteurs, qui donnent pour M des valeurs plus grandes que celle qui correspond au cylindre nu ; alors, pour ces corps, l'accroissement de surface du cylindre a plus d'influence que le ralentissement dans la transmission de la chaleur à travers leur épaisseur.

1005. Prenons pour exemple un tuyau de fonte horizontal de $0^m,05$ de rayon et de 1 mètre de longueur, chauffé par la vapeur et recouvert successivement de différentes épaisseurs de coton.

En supposant l'air extérieur à 15°, il résulte de ce que nous avons dit (924), que la quantité de chaleur émise par mètre carré et par heure, quand le tuyau est nu, est égale à 805, et pour 1 mètre de longueur, cette quantité deviendra $805 . 2\pi R = 252,77$.

Pour trouver les quantités de chaleur transmises par mètre courant et par heure, par le tuyau, quand il est recouvert d'une couche de coton ayant

$0^m,01$	$0^m,02$	$0^m,03$	$0^m,04$	$0^m,05$	$0^m,10$	$0^m,15$

d'épaisseur, il faut, dans la formule, faire $C = 0,04$; $R = 0,05$, et donner successivement à R' les valeurs

0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,15	0,20.

Pour obtenir les valeurs de Q, il faut se souvenir que $Q = K + K'$; K et K' étant les coefficients de refroidissement par rayonnement et

par le contact de l'air ; si l'on suppose la matière enveloppante couverte de toile, on aura K = 3,65 ; et les valeurs de K′ se déduiront de la formule (916). On trouve ainsi pour K′

2,70 2,60 2,53 2,48 2,44 2,31 2,24

et pour les valeurs de Q

6,35 6,25 6,18 6,13 6,09 5,96 5,90.

Les valeurs de N sont

0,182 0,336 0,459 0,587 0,693 1,098 1,385.

En substituant dans la formule (*a*) les nombres constants, elle devient

$$M = \frac{21{,}36 \cdot QR'}{0{,}04 + QR'N};$$

et on obtient les résultats suivants :

$R' = 0{,}06 \quad R = 0{,}05 \quad M = \frac{8{,}138}{0{,}109} = 74{,}6$

$R' = 0{,}07 \quad R = 0{,}05 \quad M = \frac{9.315}{0{,}186} = 50{,}2$

$R' = 0{,}08 \quad R = 0{,}05 \quad M = \frac{10{,}550}{0{,}271} = 39{,}1$

$R' = 0{,}09 \quad R = 0{,}05 \quad M = \frac{11{,}75}{0{,}363} = 32{,}3$

$R' = 0{,}10 \quad R = 0{,}05 \quad M = \frac{13{,}01}{0{,}462} = 28{,}2$

$R' = 0{,}15 \quad R = 0{,}05 \quad M = \frac{18{,}09}{1{,}02} = 18{,}7$

$R' = 0{,}20 \quad R = 0{,}05 \quad M = \frac{25{,}205}{1{,}674} = 15{,}0$

Si les enveloppes étaient recouvertes d'une lame de fer-blanc, on aurait K = 0,4, et, par suite, les valeurs de Q deviendraient

3,10 3,00 2,93 2,88 2,84 2,71 2,65

et on trouverait pour les valeurs de M

53,8 40,8 33,3 28,8 25,7 17,8 14,6.

L'influence du faible rayonnement de la surface va en diminuant à mesure que l'épaisseur de la couche augmente, parce que la valeur de C, relativement au terme QR′N, va toujours en diminuant, et que,

si l'on pouvait négliger C, la valeur de M deviendrait tout à fait indépendante de Q.

1006. Dans les calculs précédents, nous avons admis 0,04 pour la valeur de C ; si on supposait une conductibilité 2 fois, 4 fois, 8 fois... n fois plus grande, il suffirait, pour obtenir les valeurs de M correspondantes, de multiplier le numérateur des fractions qui représentent les valeurs de M, dans le tableau précédent, par 2, 4, 8... n, et d'ajouter au dénominateur, 0,04 ; 0,12 ; 0,28..., 0,04 $(n - 1)$. C'est ainsi qu'on a obtenu les valeurs suivantes qui correspondent aux mêmes valeurs de R′ et aux mêmes températures intérieure et extérieure. La quantité de chaleur qui serait émise par le cylindre nu serait toujours égale à 252,77.

TABLEAU DES QUANTITÉS DE CHALEUR TRANSMISES PAR MÈTRE COURANT PAR UN TUYAU CYLINDRIQUE HORIZONTAL DE $0^m,05$ DE RAYON, CHAUFFÉ A 100°, PLACÉ DANS UNE ENCEINTE A 15°, ET RECOUVERT D'UNE ENVELOPPE DE DIFFÉRENTES ÉPAISSEURS ET DE DIFFÉRENTES CONDUCTIBILITÉS.

CONDUCTIBILITÉ.	ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ENVELOPPANTE.						
	$0^m,01$	$0^m,02$	$0^m,03$	$0^m,04$	$0^m,05$	$0^m,10$	$0^m,15$
	QUANTITÉS DE CHALEUR TRANSMISES.						
0,01	74,6	50,2	39,1	32,3	28,2	18,7	15,0
0,08	109,2	82,7	67,8	58,3	51,8	34,1	29,4
0,16	142,1	122,1	107,9	97,3	89,4	63,4	56,6
0,32	167,3	160,4	153,1	146,3	140,2	111,3	103,2
0,64	183,6	190,2	193,8	195,2	196,0	178,6	177,3
1,28	193,3	209,7	223,4	234,5	244,6	256,1	276,7
2,56	198,0	221,0	241,9	260,8	279,2	327,0	381,6
5,12	200,7	227,1	252,3	276,3	300,4	379,6	477,6

1007. On voit, d'après ce tableau, que les valeurs de M diminuent très-rapidement avec l'accroissement d'épaisseur quand la conductibilité est très-petite ; que les variations sont très-faibles pour C = 0,64 ; et que, pour des valeurs de C plus grandes, les valeurs de M augmentent avec l'épaisseur de la matière enveloppante. Pour

d'autres valeurs du rayon du cylindre intérieur, les mêmes phénomènes se reproduiraient encore, mais pour d'autres épaisseurs.

1008. Comme on conduit souvent de la vapeur par des tuyaux dans lesquels il importe de diminuer, autant que possible, sa condensation, nous avons calculé le tableau suivant, qui donne les quantités de chaleur émises, par mètre courant de tuyaux, de différents rayons, chauffés par la vapeur, recouverts de différentes épaisseurs de coton, et placés dans une enceinte à 15°. Pour chaque rayon du cylindre et chaque épaisseur de matière enveloppante, le tableau présente deux nombres, celui qui est supérieur représente la quantité de chaleur émise par mètre courant, et le nombre inférieur, le rapport de cette quantité à celle qui serait perdue, si le tuyau était nu. J'ai supposé la fonte oxydée et son rayonnement égal à 3,35.

RAYON du CYLINDRE.	ÉPAISSEURS DE LA COUCHE ENVELOPPANTE.							
	0m,00	0m,01	0m,02	0m,03	0m,04	0m,05	0m,10	0m,15
	QUANTITÉS DE CHALEUR TRANSMISES PAR MÈTRE COURANT.							
0,01	75,92	22,40 (0,295)	16,5 (0,217)	13,9 (0,183)	12,3 (0,162)	11,2 (0,147)	8,7 (0,114)	7,9 (0,104)
0,02	120,15	35,8 (0,298)	25,6 (0,213)	20,9 (0,174)	17,7 (0,147)	15,6 (0,129)	11,5 (0,095)	9,8 (0,081)
0,03	164,33	49,0 (0,298)	33,7 (0,305)	26,7 (0,162)	22,8 (0,138)	20,1 (0,122)	14,1 (0,085)	11,6 (0,070)
0,04	208,56	61,7 (0,295)	41,8 (0,200)	33,3 (0,159)	27,5 (0,131)	24,2 (0,111)	16,4 (0,078)	13,4 (0,064)
0,05	252,64	74,5 (0,294)	50,2 (0,198)	39,1 (0,154)	32,4 (0,128)	28,2 (0,111)	18,7 (0,073	15,0 (0,058)
0,10	473.51	137,7 (0,290)	90,2 (0,190)	68,2 (0,144)	55,8 (0,117)	47,7 (0,100)	29,3 (0,061)	22,6 (0,047)
0,15	694,84	200,8 (0,289)	130,4 (0,187)	97,6 (0,140)	78,7 (0,113)	66,4 (0,095)	39,6 (0,057)	30,8 (0,044)
0,20	916,20	263,9 (0,288)	169,3 (0,184)	125,8 (0,137)	101,5 (0,110)	85,4 (0,093)	49,9 (0,054)	38,2 (0,041)

1009. Dans tout ce qui précède, j'ai supposé que la valeur de Q était constante, c'est-à-dire que la loi de Newton, relative au refroi-

dissement, existait pour tous les excès de température; or, il n'en est pas ainsi, comme nous l'avons vu (922), et la valeur de Q augmente assez rapidement avec la température; ainsi, les différentes valeurs de M, calculées d'après la formule (*a*), ne peuvent être considérées que comme des valeurs approchées, et d'autant plus exactes, qu'elles sont plus petites, parce que l'excès de la température décroît avec M. Mais il est facile, dans chaque cas particulier, d'obtenir une valeur de la quantité de chaleur transmise très-voisine de la réalité. Supposons que l'on ait d'abord calculé la valeur de M par la formule (1002); en divisant cette valeur par SQ, on aura la température t' de la surface, et au moyen des formules renfermées dans les tableaux (912), (921), on en déduira une nouvelle valeur Q_1 de Q, puis de nouvelles valeurs M_1 et t_1, et ainsi de suite, jusqu'à ce que deux valeurs de M consécutives soient égales.

Je prendrai pour exemple un tuyau de fonte de $0^m,05$ de rayon, recouvert de 0,01 de coton, renfermant de la vapeur à 100°, et placé dans de l'air à 15°. Nous avons déjà trouvé pour ce cas $M = 74,6$. La surface du mètre courant extérieur étant de $0^m,377$, l'excès de température de la surface sera de $74,6 : 0,377 . 6,35 = 31° 21$; la nouvelle valeur de Q est $Q_1 = 3,65 . 1,22 + 2,70 . 1,27 = 7,88$; d'où l'on tire $M_1 = 80° 1$; $t_1 = 80,1 : 2,97 = 27°$; puis $Q_2 = 7,47$; $M_2 = 78,4$; et $t_2 = 27° 84$; ainsi, la valeur de M est de 78 au lieu de 74, différence fort peu considérable. La différence serait encore beaucoup plus petite pour des épaisseurs plus grandes de la matière enveloppante.

1010. En général, quand les tuyaux n'ont qu'un petit diamètre, le second terme du dénominateur de la valeur de M est très-grand relativement au premier terme, du moins quand la matière enveloppante conduit mal la chaleur. En ce cas, on voit que le dénominateur est presque proportionnel à Q comme le numérateur, et, par suite, que la valeur de Q a peu d'influence. Ainsi, les résultats numériques que nous avons rapportés peuvent être considérés comme suffisamment approchés pour la pratique. Mais il n'en serait plus de même, si, la différence des rayons ne changeant pas, la valeur de R était très-grande, parce que la différence des logarithmes pourrait rendre dominant le second terme du dénominateur de M, et on trouverait une différence notable entre les résultats du calcul direct et ceux de la méthode d'approximation que j'ai indiquée.

1011. Je prendrai pour exemple particulier un cas qui se rencontre dans presque tous les générateurs de vapeur. Leur surface

est, en général, recouverte de matières conduisant mal la chaleur, et il est important de connaître l'influence des différentes matières qu'on peut employer pour diminuer la perte de chaleur. Je supposerai que le cylindre formant la chaudière a 1 mètre de diamètre; la quantité de chaleur émise par mètre carré et par heure est donnée par la formule suivante

$$M = \frac{QC(t-\theta)}{C + QRn \log R'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (a)$$

Admettons qu'on ait, comme précédemment, $Q = 2{,}1 + 3{,}65 = 5{,}75$, et que la matière enveloppante soit de la poussière de bois mélangée d'un peu de terre argileuse et de bourre pour la rendre plastique; nous pourrons admettre que $C = 0{,}1$. En prenant pour l'épaisseur de la matière enveloppante

$0^m{,}01$ $0^m{,}02$ $0^m{,}03$ $0^m{,}04$ $0^m{,}05$,

la surface extérieure de l'enveloppe étant nue, la formule (a) donne directement pour M

292 213 168 141 116.....(1)

et par la méthode d'approximation indiquée (1009)

340 232 180 146 110.....(2)

si la surface est couverte d'une lame d'étain, on a par la formule (a)

150 126 109 97 80.....(3)

et par la méthode d'approximation

197 153 127 109 86.....(4)

Il résulte de ces nombres et de ce que la chaleur émise par la surface libre est 671, que les enveloppes seules réduisent la transmission de la chaleur à

0,506 0,346 0,27 0,217 0,164.....(5)

et ces mêmes enveloppes recouvertes d'étain à

0,29 0,228 0,189 0,164 0,13.....(6)

Les lames d'étain ont une influence très-grande, mais qui diminue

avec l'épaisseur, car les rapports des nombres correspondants des séries (5) et (6) sont

0,57 0,65 0,70 0,75 0,80.....(7)

J'ai supposé $t = 100$; si la température était supérieure, les valeurs de M seraient proportionnelles à $t - \theta$; mais alors, les quantités de chaleur émises croissant plus rapidement que les excès de température, les nombres de la série (5) diminueraient à mesure que la température augmenterait.

Si, par exemple, la vapeur était à 140°, ce qui correspond à 4 atmosphères environ, l'excès de température serait de 120° ; les quantités de chaleur transmises par l'enveloppe nue seraient de

595 406 315 255 192

et les quantités relatives de chaleur transmise

0,416 0,284 0,220 0,178 0,134.

On aurait sensiblement les mêmes résultats pour des enveloppes en bois de sapin et de noyer, formées de planches parallèles aux fibres.

1012. *Transmission de la chaleur à travers les enveloppes sphériques.* — En conservant les mêmes notations que précédemment, on trouve

$$M = -\frac{4\pi r^2 C dt}{dr}; \quad \text{ou} \quad 4\pi C dt = -M\frac{dr}{r^2},$$

et en intégrant cette dernière équation entre les limites t et t' pour t, R et R′ pour r, on a

$$4\pi C(t - t') = M\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right); \quad \text{d'où} \quad M = \frac{4\pi CRR'(t - t')}{R' - R}.$$

Mais comme $M = 4\pi R'^2 Q\,(t' - \theta)$, en éliminant t', on trouve

$$M = \frac{4\pi CQRR'(t - \theta)}{CR + QR'(R' - R)},$$

équation dans laquelle M représente la quantité de chaleur émise par la surface totale de la sphère. Pour obtenir celle qui est émise par mètre carré, il est évident qu'il faudrait diviser M par $4\pi R'^2$.

Diffusion de la chaleur.

1013. Dans tout ce qui précède, nous n'avons considéré la transmission de la chaleur à travers les corps que lorsqu'un régime permanent de température y était établi; dans ce cas, les lois de la transmission sont très-simples, et les formules que nous avons données permettent de calculer les quantités de chaleur transmises dans les différents cas qui se présentent ordinairement. Mais, avant l'établissement du régime, dans les corps terminés par deux surfaces dont l'une reçoit la chaleur et l'autre la disperse, et pendant toute la durée de l'échauffement, pour les corps indéfinis dans un sens, les températures des différents points varient avec leurs positions et avec le temps, suivant des lois très-compliquées, qui dépendent à la fois de la forme des corps, de la conductibilité de la matière, de sa capacité calorifique et de sa densité; alors ce ne sont pas toujours les corps formés des matières qui conduisent le mieux la chaleur qui la dispersent le plus facilement, parce que la dispersion dépend du rapport de la conductibilité à la capacité calorifique de la matière.

1014. Il résulte des calculs consignés dans la note ci-jointe (1),

(1) La question dont il s'agit a été résolue, à ma prière, par M. Cauchy; voici la formule à laquelle cet habile géomètre a été conduit

$$T' = T\left\{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{kt}}} e^{-\varphi^2}\,d\varphi\right\}.$$

Dans cette formule, T représente la température constante de la surface plane qui termine le milieu, dont la température initiale était 0°, T' représente la température d'une couche du milieu, située à une distance x et après le temps t, et k le rapport de la conductibilité de la matière à sa capacité calorifique multipliée par sa densité. Les valeurs de l'intégrale

$$A = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\varphi} e^{-\varphi^2}\,d\varphi$$

ont été calculées par Kramp, et se trouvent rapportées dans l'ouvrage de M. Cournot sur la théorie des chances et des probabilités. Nous donnerons ici quelques valeurs de cette intégrale qui permettront de calculer les valeurs de T' avec un degré suffisant d'approximation.

$\varphi = 0$.....A = 0,000	$\varphi = 0{,}8$.....A = 0,742	$\varphi = 1{,}6$.....A = 0,976
$\varphi = 0{,}1$.....A = 0,112	$\varphi = 0{,}9$.....A = 0,796	$\varphi = 1{,}7$.....A = 0,983
$\varphi = 0{,}2$.....A = 0,223	$\varphi = 1{,}0$.....A = 0,812	$\varphi = 1{,}8$.....A = 0,989
$\varphi = 0{,}3$.....A = 0,328	$\varphi = 1{,}1$.....A = 0,880	$\varphi = 1{,}9$.....A = 0,993
$\varphi = 0{,}4$.....A = 0,428	$\varphi = 1{,}2$.....A = 0,910	$\varphi = 2{,}0$.....A = 0,995
$\varphi = 0{,}5$.....A = 0,520	$\varphi = 1{,}3$.....A = 0,934	$\varphi = 2{,}1$.....A = 0,997
$\varphi = 0{,}6$.....A = 0,603	$\varphi = 1{,}4$.....A = 0,952	$\varphi = 2{,}2$.....A = 0,998
$\varphi = 0{,}7$.....A = 0,677	$\varphi = 1{,}5$.....A = 0,966	$\varphi = 2{,}3$.....A = 0,999

que si l'on considère une surface plane indéfinie maintenue à une température T, et au-dessous un corps homogène, d'une très-grande épaisseur, à la température 0°, après une minute, les températures à des distances de

	0m,001	0m,01	0m,1	1m,0,
seront				
Pour le sable.....	0,988T;	...0,887T;	...0,154T;	...0,000
Pour la pierre calcaire de construc.	0,997T;	...0,973T;	...0,745T;	...0.001T
Pour le fer.....	0,999T;	...0,992T;	...0,924T;	...0,339T
Pour le marbre à gros grains.....	0,999T;	...0,993T;	...0,938T;	...0,439T
Pour le plâtre de construction.....	0,996T;	...0,962T;	...0,624T;	...0,000
Pour l'eau stagnante.....	0,993T;	...0,939T;	...0,399T;	...0,000

1015. La formule qui a servi à calculer ces nombres est une conséquence rigoureuse du principe élémentaire de la transmission de la chaleur qui a été constaté par un trop grand nombre d'expériences pour qu'il soit permis de douter de son exactitude; mais, dans l'établissement de cette formule, on a négligé l'effet de la dilatation et des variations de capacités calorifiques par la température; cependant, comme pour les corps solides, les dilatations, les variations de capacités et probablement les variations de conductibilité sont faibles, on peut regarder la formule comme représentant les faits avec une grande approximation. Alors les nombres que nous venons de rapporter font voir avec quelle rapidité la chaleur se disperse dans les corps, même dans ceux qui conduisent mal la chaleur, après l'établissement d'un régime permanent de température.

1016. Si l'on appliquait la formule à l'air supposé stagnant, ce

Il est important de remarquer que, les valeurs des conductibilités données précédemment représentant les quantités de chaleur qui traversent, dans une heure, des plaques d'un mètre carré de surface, d'un mètre d'épaisseur, et dont les températures des surfaces diffèrent de 1°, il faut prendre le mètre pour unité de longueur, et l'heure pour unité de temps. Dans les calculs relatifs à l'eau, j'ai supposé que sa conductibilité était la même que celle de la colle d'amidon. Voici du reste les valeurs des conductibilités C, des capacités calorifiques c, et des densités d admises pour calculer les valeurs de k relatives aux différents corps que j'ai considérés :

Sable quartzeux..	$C = 0{,}27$;	$c = 0{,}2$;	$d = 1{,}47$;	$k = 0{,}917$
Pierre calcaire...	$C = 1{,}27$;	$c = 0{,}21$;	$d = 2{,}22$;	$k = 2{,}76$
Fer.....	$C = 29{,}0$;	$c = 0{,}118$;	$d = 7{,}78$;	$k = 33{,}00$
Marbre.....	$C = 2{,}78$;	$c = 0{,}2$;	$d = 2{,}77$;	$k = 5{,}018$
Plâtre.....	$C = 0{,}331$;	$c = 0{,}196$;	$d = 1{,}25$;	$k = 1{,}351$
Eau stagnante...	$C = 0{,}425$;	$c = 1{,}10$;	$d = 1$;	$k = 0{,}425$
Air.....	$C = 0{,}04$;	$c = 0{,}25$;	$d = 0{,}0013$;	$k = 123.$

qui arriverait s'il était échauffé par la partie supérieure, on n'obtiendrait certainement qu'une approximation un peu vague, à cause de la grande dilatation qu'il éprouverait et des variations inconnues de sa conductibilité avec l'accroissement de température. Cependant, comme les résultats du calcul peuvent au moins donner une idée de la rapidité avec laquelle la chaleur se dissémine dans ce corps, nous les indiquerons. Après une minute et aux distances

$$0^m,001.....0^m,01.....0^m,1.....\text{ et } 1^m,$$

les températures indiquées par la formule sont

$$0,999\,T;.....0,996\,T;.....0,960\,T;.....0,620\,T;$$

et après 1, 4, 9, 16, 25, 36 secondes, les températures aux mêmes distances seraient

1″.....	0,997 T;	.....0,973 T;	.....0,730 T;	.....0,00056 T
4″.....	0,998 T;	.....0,986 T;	.....0,865 T;	.. ...0,0844 T
9″.....	0,999 T;	.....0,991 T;	.....0,908 T;	.....0,2520 T
16″.....	0,999 T;	.....0,993 T;	.....0,931 T;	.....0,38851 T
25″.....	0,999 T;	.....0,994 T;	.....0,948 T;	.....0,4900 T
36″.....	0,999 T;	.....0,995 T;	.....0,954 T;	.....0,5710 T

Si la formule employée était exactement applicable à l'air, il en résulterait que la dispersion de la chaleur à travers l'air serait plus grande qu'à travers tous les autres corps; mais on peut certainement conclure de ces résultats que la dispersion de la chaleur à travers l'air s'effectue avec une grande rapidité. Ce fait explique d'ailleurs un grand nombre de phénomènes qui paraissaient fort singuliers.

1017. Dans les églises chauffées par de l'air chaud qui s'échappe d'un certain nombre d'orifices percés dans le sol, les températures de l'air à 2 mètres et 20 mètres de hauteur diffèrent à peine de 1 degré, comme cela a été constaté à la Madeleine et à Saint-Roch. Dans le refroidissement des corps provenant du contact de l'air, la quantité de chaleur perdue diminue très-lentement avec la hauteur des corps, ce qui ne peut s'expliquer que par la facile dispersion de la chaleur à travers l'air. Il résulte aussi de ce fait que, dans le chauffage des appartements par des foyers découverts, on utilise non-seulement une partie du rayonnement, mais encore une partie de la chaleur produite qui se transmet par dispersion à l'air environnant.

1018. M. Darcy, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a fait

des expériences fort intéressantes sur le refroidissement éprouvé par l'eau chaude du puits artésien de Grenelle, en parcourant des tuyaux placés dans la terre. La longueur totale de la conduite en fonte était de 2,320 mètres ; son diamètre variait de $0^m,162$ à $0^m,25$ Le volume d'eau écoulé par seconde était de $3^l,68$; le refroidissement de 26°,75 à 20°,90, c'est-à-dire de 5°,85 ; la perte de chaleur par seconde était donc de $3,68.5,85 = 21^c,53$, et par heure 21,50. 3600 = 77508 calories ; et comme les tuyaux avaient une surface totale de $1527^m,84$, la quantité de chaleur émise par mètre carré et par heure était de 77508 : 1527,84 = 50,70 pour une température moyenne de 23°,8. Le temps employé par une tranche liquide pour parcourir la longueur du canal était de $8^h,30'$. Le liquide en repos s'est refroidi de 5°,5 en 7 heures. Il est probable que la transmission est proportionnelle à la température du tuyau, et que pour de la vapeur elle serait comprise entre 200 et 300 calories.

1019. *Influence des variations de la température extérieure sur la quantité de chaleur transmise par les murailles.* — Dans ce que nous avons dit sur la transmission de la chaleur à travers les corps mauvais conducteurs, nous avons supposé que le régime était établi, et par conséquent que les températures intérieure et extérieure étaient constantes ; ordinairement le chauffage est dirigé de manière que la température intérieure ne change pas, mais la transmission de la chaleur est toujours soumise à l'influence des variations de la température extérieure. Ces variations sont de deux espèces : le décroissement et l'accroissement général de la température moyenne extérieure, pendant la saison du chauffage, et les perturbations accidentelles qui se manifestent fréquemment chaque jour. Examinons successivement les influences de ces deux espèces de variations.

Dans notre climat, le chauffage a généralement lieu du 1er octobre à la fin d'avril, et, pendant ces sept mois, les températures moyennes extérieures, déduites de dix années d'expériences, sont de

Octobre.	Novembre.	Décembre.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.
11°	7°,3	3°,01	2°,29	4°,34	6°,59	10°,49.

En supposant que la température intérieure soit maintenue à 15°, que les murailles soient toutes exposées à l'air, et que leur épaisseur soit de 1 mètre, la quantité totale de chaleur transmise par mètre carré pendant toute la durée du chauffage, en admettant que le régime soit constamment établi, sera (988) de 7,03. 210. 24 = 35431,

et la chaleur renfermée dans la muraille à 15° serait 1000. 2,2. 0,2. 15 = 6600. Cette dernière quantité n'étant que les 12 centièmes de la première, et le refroidissement de la muraille n'étant jamais complet, on conçoit facilement que si les variations de température avaient lieu d'une manière continue, sans oscillations brusques, quelle que soit la loi suivant laquelle la muraille se refroidira dans la première période de l'hiver et se réchauffera dans la seconde, les quantités de chaleur, émises et absorbées successivement par la muraille, ne pourront avoir qu'une faible influence sur la transmission, dans l'hypothèse d'un régime constamment maintenu. On voit en outre que, pendant le décroissement de la température extérieure, le refroidissement des murailles diminuera d'une petite quantité la chaleur à fournir pour maintenir la température intérieure, et que, pendant l'accroissement de la température extérieure, il y aura plus de chaleur à fournir pour rétablir le régime primitif des murailles.

1020. D'après ce que je viens de dire, la courbe des températures moyennes mensuelles des mois de chauffage ne présente qu'un minimum ; mais, chaque jour, il y a plusieurs variations successivement en sens contraire, de sorte que la courbe réelle des températures offre un grand nombre de sinuosités autour de la courbe des températures moyennes. Ces variations agissent directement par les vitres sur l'espace échauffé, parce que les vitres prennent à peu près instantanément une température moyenne entre celle de l'intérieur et de l'extérieur. Il n'en est pas de même des murailles : elles fournissent, lorsque la température extérieure s'abaisse, une certaine quantité de chaleur, et, lorsque la température extérieure se relève au point primitif, elles absorbent la même quantité de chaleur, de sorte que la quantité de chaleur à fournir, pour produire une température constante, varie beaucoup moins rapidement que la température extérieure. Comme ces variations sont égales et de signes contraires autour de la courbe des températures moyennes, de quelque manière que s'effectuent les refroidissements et les réchauffements partiels de la muraille, les pertes et les gains finissent par se compenser, et la dépense totale de chaleur pendant la durée du chauffage reste la même que si la température extérieure avait toujours été celle qui correspond à la courbe des températures moyennes mensuelles, ou bien encore que si la température extérieure était constamment restée à la température moyenne, comme l'expérience le démontre.

1021. Les phénomènes qui se produisent dans les murailles par

des variations brusques dans la température extérieure sont très-compliqués. S'il survient un refroidissement, il y a un accroissement de perte par la surface extérieure, un abaissement de température qui se propage de proche en proche jusqu'à la surface intérieure, et si cette température de l'air extérieur dure un temps suffisant, il s'établira dans la muraille un nouveau régime. Dans cet intervalle, les températures des différents points de la muraille éprouveront des variations qu'il serait réellement impossible de calculer, car ces calculs seraient encore plus compliqués que ceux de la transmission de la chaleur dans un milieu indéfini à une température constante (885). Mais comme les murailles ont rarement une épaisseur qui dépasse $0^m,50$, que la dissémination de chaleur à travers les corps, même d'une assez faible conductibilité comme les matériaux de construction, s'effectue avec une grande rapidité, et que les différences de température des deux surfaces ne sont en général que d'un petit nombre de degrés, on peut supposer que, pendant toutes les variations de température qui précèdent l'établissement du nouveau régime, les températures des différents points de la muraille croissent toujours uniformément de l'extérieur à l'intérieur. Cette supposition n'est jamais réalisée ; mais elle permet de suivre à peu près les phénomènes qui accompagnent un refroidissement de l'air extérieur.

Considérons d'abord une muraille appartenant à une pièce dont les autres faces ne sont pas exposées à l'air ; supposons, comme dans l'article (985), $T=15°$; $\theta=6°$; $C=1,70$, et $c=0,50$; nous aurons $t=12°,56$; $t'=8°,99$, et $M=16,23$. Si la température extérieure devenait 0°, les formules (a) (854), donneraient $t=10°,87$; $t'=4°,12$; et $M=22,93$; la quantité de chaleur perdue par la muraille par mètre carré, pour passer du premier régime au second, serait de

$$1000 \,.\, 0,5 \,.\, 2,22 \,.\, 0,21 \left[\frac{12,56+8,99}{2} - \frac{10,87+4,12}{2}\right] = 382 \text{ calories},$$

et comme ce refroidissement a lieu pendant que la température de la surface extérieure s'abaisse de 8°,99 à 4°,12, ce refroidissement est décroissant ; en admettant l'hypothèse de la variation uniforme de température, ce refroidissement aura lieu dans le même temps que si l'excès de température de la surface extérieure était égal à $\frac{8°,99+4°,12}{2}$, ou de 6°,55 ; or, comme, pour un excès de température de 8°,99, il sort par heure 16,23 calories, le refroidissement en question s'effectuerait dans un nombre d'heures égal à $\frac{382.1,37}{16,23}=32$.

Cela suppose toutefois que la température intérieure est maintenue à 15°, et que le refroidissement de la muraille s'effectue comme nous l'avons supposé ; mais en réalité le refroidissement sera beaucoup moins rapide, parce que la température de la surface extérieure sera beaucoup plus basse que nous ne l'avons admis, et que les températures des différentes tranches de la muraille se succéderont suivant un autre loi qui concourra aussi à ralentir le refroidissement.

1022. On voit d'après cela que, si une pièce ne se refroidissait que par ses murailles, les variations de la température extérieure ne se manifesteraient que très-lentement et très-affaiblies à l'intérieur. Mais les pièces ont toujours des fenêtres vitrées, et le verre prenant presque instantanément la température moyenne entre celle de l'intérieur et celles de l'extérieur, il faut, pour maintenir la pièce à une température constante, des accroissements de chaleur qui varient avec la température extérieure, et qui sont en général très-grands relativement à ceux qui résulteraient de la transmission de la chaleur à travers les murailles.

Considérons, par exemple, une pièce n'ayant qu'une seule face exposée à l'air, ayant 4^{mq} de surface vitrée et 6^{mq} de murailles de $0^{m},50$ d'épaisseur ; la température intérieure étant de 15° et la température extérieure de 6°, la quantité totale de chaleur transmise sera (998) et (985) de $4.23 + 6.16,23 = 92 + 97,38$. Si on suppose que la température extérieure s'abaisse à 0°, la quantité de chaleur transmise par les vitres sera portée immédiatement de 92 à 153, tandis que la transmission à travers les murailles s'élèvera très-lentement, en 32 heures, de 97,38 à 137,58, et certainement, en réalité, dans un temps beaucoup plus long. Ainsi les vitres ont une influence beaucoup plus grande que les murailles sur les variations de la température intérieure ou sur les quantités de chaleur à fournir pour maintenir la température, à moins cependant que les murailles ne soient très-minces et n'aient une grande étendue relativement aux surfaces vitrées.

1023. Comme il est important d'avoir une idée bien nette des variations de température qui se produisent sur les surfaces des murailles pendant la durée d'une saison de chauffage, ainsi que des quantités de chaleur transmises pour différentes valeurs de la température extérieure et des quantités de chaleur renfermées dans les murailles, j'ai calculé ces différents éléments pour des murailles de $0^{m},5$, $1^{m},0$, $1^{m},5$, et 2 mètres d'épaisseur d'après les formules (987), qui supposent toutes les murailles exposées à l'air. J'ai pris $C = 1,70$;

K = 3,60 ; K′ = 1,96 ; Q = 5,56 ; en supposant que la densité de la pierre soit égale à 2,2, et sa capacité calorifique à 0,2, la quantité de chaleur renfermée dans un mètre carré de muraille à la température v est égale à

$$1000 \,.\, e \,.\, 2{,}2 \,.\, 0{,}2 \,.\, v = 440 \,.\, ev.$$

Lorsque les températures varieront uniformément de t à t', entre les deux surfaces, la quantité de chaleur renfermée dans la muraille à partir de 0° sera $440 \,.\, e \,\frac{t+t'}{2}$; je la désignerai par A, et on aura, en appelant T la température intérieure de la pièce et la température extérieure, pour $e = 0^m,50$,

$t = 0{,}48T + 0{,}520$. $t' = 0{,}18T + 0{,}8170$. $M = 1{,}015(T - 0)$. $A = 220(0{,}33T + 0{,}6686)$;

pour $e = 1^m,00$,

$t = 0{,}60T + 0{,}40$. $t = 0{,}14T + 0{,}860$. $M = 0{,}782(T - 0)$. $A = 440(0{,}37T + 0{,}680)$;

pour $e = 1^m,50$,

$t = 0{,}675T + 0{,}320$. $t' = 0{,}114T + 0{,}890$. $M = 0{,}635(T - 0)$. $A = 660(0{,}39T + 0{,}609)$;

pour $e = 2^m$,

$t = 0{,}726T + 0{,}270$. $t' = 0{,}096T + 0{,}900$. $M = 0{,}535(T - 0)$. $A = 880\,(0{,}41T + 0{,}586)$.

Chauffage intermittent.

1024. Dans ce qui précède, nous avons supposé le chauffage continu : mais souvent il est interrompu pendant la nuit, et d'autres fois il n'a lieu que pendant un temps très-limité ; de là deux questions à étudier, la perte de chaleur par la suspension du chauffage pendant la nuit, et la quantité de chaleur à dépenser pour maintenir pendant un certain temps une pièce à une certaine température.

1025. *Chaleur perdue par les murailles pendant la suspension du chauffage.*— Durant cette suspension, qui a généralement lieu pendant la nuit, la chaleur émise par la surface extérieure des murailles produit un certain refroidissement dans leur masse et par suite un certain refroidissement intérieur qui s'ajoute à celui qui provient des vitres. Ce refroidissement des pièces pendant la suspension du chauffage est une question très-importante, malheureusement très-compliquée, mais sur laquelle des considérations théoriques peuvent cependant conduire à des résultats utiles pour la pratique.

1026. Considérons le cas le plus simple, celui où tous les murs de l'enceinte sont exposés à l'air; toutes les surfaces intérieures se trouveront sensiblement à la même température, et la chaleur émise par les murailles proviendra uniquement de celle qu'elles renfermaient. J'ai essayé de calculer les températures des différents points de la muraille à une époque quelconque de son refroidissement en employant les principes et les formules de Fourier (*Traité analytique de la chaleur*); on arrive ainsi facilement à une équation très-simple qui donne la température d'un point quelconque en fonction de toutes les données de la question. Cette équation renferme des constantes arbitraires dont on détermine facilement la valeur en supposant qu'à l'origine du refroidissement les températures, dans les différents points de la muraille, se succèdent suivant le régime du refroidissement; mais, pour les déterminer de manière qu'à l'origine du refroidissement les températures soient celles du régime de transmission, on serait conduit à des calculs très-longs, à des formules composées d'une infinité de termes et qui ne seraient réellement d'aucune utilité dans la pratique. Toutefois, on peut admettre les faits suivants comme bien démontrés par l'expérience et par le calcul.

1° Quand une muraille est abandonnée à son propre refroidissement, la surface extérieure se refroidit rapidement, d'autant plus que sa conductibilité et sa capacité calorifique sont plus petites. La ligne des températures intérieures, qui était une ligne droite quand la transmission régulière était établie, devient une ligne courbe qui vient couper, à des distances croissantes avec le temps, la ligne droite du régime de transmission. La courbe du refroidissement s'approche ensuite toujours davantage, avec le temps, de celle du refroidissement régulier, en supposant que l'état primitif ait été celui du refroidissement régulier correspondant à l'origine du temps.

2° La quantité de chaleur transmise par la muraille, et qui résulte uniquement de son refroidissement, n'est jamais qu'une fraction très-petite de celle qu'elle laisserait passer dans un régime régulier de transmission.

3° La quantité de chaleur perdue par une muraille pendant dix heures n'est généralement qu'une petite partie de celle qu'elle renfermait à l'origine du refroidissement, du moins pour des murailles de $0^m,50$ d'épaisseur; par exemple, en admettant $T = 15$; $\theta = 6$, $t = 10,33$, $t' = 7,64$, $M = 9,14$ (988), la quantité de chaleur renfermée, par chaque mètre carré de surface, serait de $500 . 2,2 . 0,2$.

8,98 = 1975; tandis que la quantité de chaleur qui serait perdue dans dix heures par une transmission régulière serait seulement de 9.14 . 10 = 91,4 et la quantité de chaleur perdue par le refroidissement serait beaucoup plus petite.

4° Le refroidissement, pendant les intermittences de chauffage, résulte principalement de la transmission de la chaleur à travers les vitres, et de l'appel extérieur à travers les fissures des portes et des fenêtres, quand les pièces ont une cheminée.

1027. *Chauffage momentané d'une pièce.* — Lorsqu'une pièce ne doit être occupée que pendant un temps très-court, on peut la chauffer ou par de l'air chaud seulement, ou par le rayonnement et par l'air chaud; dans tous les cas, la perte de chaleur est représentée par la chaleur qui passe à travers les vitres et par celle qui est absorbée par les murailles. La chaleur reçue par les murailles, par le rayonnement, ou par les courants d'air qui viennent se refroidir contre leur surface, se propage de proche en proche dans leur épaisseur suivant des lois très-compliquées. Quand l'air de la pièce a été porté à une certaine température et que le chauffage cesse, le refroidissement de l'air est assez rapide, parce que la chaleur arrive dans les murailles et dans les vitres, non-seulement par les courants d'air descendant, mais aussi par la dissémination de la chaleur à travers la masse d'air; aussi, pour maintenir l'air à une température sensiblement constante, il faut un chauffage permanent.

Observations sur l'usage des formules.

1028. Tous les calculs que nous venons de faire, relativement à a transmission de la chaleur, ne peuvent pas être considérés comme rigoureusement exacts. Ceux qui sont relatifs aux transmissions élémentaires reposent sur deux hypothèses qui ne sont vraies que dans certaines limites : la loi de Newton pour le refroidissement, qui n'est approchée que pour de faibles excès de température, et la supposition que tous les points de la surface du corps exposé à l'air sont à la même température; ce qui n'est pas exact, car les parties inférieures sont toujours à une plus basse température que les parties supérieures. Relativement aux formules qui représentent la transmission de la chaleur à travers les murailles, les deux suppositions que nous avons faites (981 et 987) ne sont réellement que des cas extrêmes, entre lesquels se trouve chaque cas particulier. Mais il ne faut pas se faire illusion sur l'importance pratique de l'exactitude

rigoureuse des formules et de la précision du calcul; les plus légers mouvements de l'air ont une grande influence sur la quantité de chaleur qu'il enlève; pour les corps exposés à l'air libre, les variations accidentelles et périodiques qu'il éprouve ne permettent jamais l'existence d'un régime permanent dans les températures intérieures; enfin, dans les calculs préliminaires, on est obligé d'employer pour la conductibilité des nombres qui pour tous les corps, excepté pour les matières textiles, ne sont pas parfaitement exacts, car ils dépendent de leur densité, pour les pierres de leur état de cristallisation, pour les bois de la direction des fibres. Ainsi on ne peut regarder les résultats du calcul que comme des approximations seulement suffisantes pour guider les ingénieurs. Mais les appareils de chauffage et de ventilation ont toujours, dans les circonstances ordinaires, un excès de puissance, parce qu'ils doivent avoir été calculés pour les circonstances les plus défavorables, excès de puissance que l'on détruit, à l'inspection des thermomètres et des anémomètres, par le mouvement des registres et l'alimentation du foyer; alors l'incertitude du calcul, qui est toujours renfermée dans des limites assez restreintes, se trouve reportée sur l'excès de puissance des appareils, excès de puissance qui n'est jamais nécessaire que dans des cas rares et de courte durée. Ceci n'est point particulier aux appareils de chauffage; dans tous les genres d'application, les calculs reposent toujours sur certaines données qui ne sont jamais connues qu'approximativement, et toujours les appareils, quel que soit l'usage auquel ils sont destinés, doivent avoir un excès de puissance ou un excès de résistance destinés à couvrir les incertitudes du calcul, ou à satisfaire à des circonstances exceptionnelles.

NOTE.

TABLES ET RENSEIGNEMENTS

RELATIFS

AUX PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CORPS.

Dans cette note, nous allons énoncer rapidement et sans aucune démonstration les prnicipaux faits physiques, et donner les nombres indispensables pour les calculs dans les applications. Ce résumé, avec les tables qui l'accompagnent, complète les matières traitées dans ce volume, qui renfermera tous les éléments nécessaires à l'étude des divers modes d'emploi de la chaleur dans l'industrie.

§ I. — DENSITÉ.

1. On appelle densité d'un corps par rapport à un autre, le rapport du poids d'un certain volume du premier corps au poids d'un égal volume du second.

2. Pour les corps solides et liquides, la densité se prend par rapport à l'eau à la température de 4°.

3. Pour les gaz, les densités sont rapportées à l'air. Pour avoir la densité d'un gaz par rapport à l'eau, quand on connaît la densité par rapport à l'air, il suffit de multiplier cette dernière par le nombre 0,00129, qui représente la densité de l'air par rapport à l'eau.

4. Les tableaux suivants donnent les densités des principaux corps solides, liquides et gazeux, à la température de 0°.

TABLEAU DE LA DENSITÉ DE QUELQUES CORPS SOLIDES, LIQUIDES ET GAZEUX

A LA TEMPÉRATURE DE 0°.

SOLIDES.

Platine laminé	21,50	Topaze de Saxe	3,5610
Or laminé	19,50	Diamants les plus lourds	3,5310
Or (monnaie de France)	17,65	Diamants les plus légers	3,5010
Tungstène	17,50	Flint-glass	3,3293
Palladium	11,80	Spath fluor	3,1911
Plomb	11,445	Tourmaline verte	3,1555
Rhodium, environ	10,60	Saphir du Brésil	3,1308
Argent fondu	10,47	Asbeste roide	2,9958
Osmium, environ	10	Marbre de Paros	2,8376
Bismuth	9,90	Quartz jaspe onyx	2,8160
Cuivre en fil	8,88	Émeraude verte	2,7755
Nickel	8,80	Perles	2,7500
Cuivre fondu	8,78	Chaux carbonatée cristallisée	2,7182
Bronze	8,70	Quartz jaspe	2,7101
Cadmium	8,70	Corail	2,6800
Bronze d'artillerie	8,67	Cristal de roche pur	2,6530
Molybdène	8,62	Quartz agate	2,6150
Ruthénium, environ	8,60	Feldspath limpide	2,5644
Cobalt	8,50	Aluminium	2,560
Laiton	8,39	Verre de Saint-Gobain	2,4882
Manganèse	8,00	Porcelaine de la Chine	2,3847
Acier non écroui	7,82	Chaux sulfatée cristallisée	2,3177
Fer, varie de 7,7 à	7,90	Chaux, environ	2,3
Étain	7,29	Graphite naturel	2,20
Fonte de fer	7,20	Porcelaine de Sèvres	2,1457
Zinc laminé	7,20	Potasse, environ	2,1
Zinc fondu	6,86	Soufre natif	2,0332
Antimoine, environ	6,80	Soufre fondu	1,99
Protochlorure de mercure	6,50	Azotate de potasse	1,933
Tellure	6,11	Sel commun	1,92
Chrome, environ	6,00	Ivoire	1,9170
Arsenic, environ	5,80	Albâtre	1,8740
Titane	5,30	Chlorure de potassium, env.	1,84
Iode	4,95	Anthracite	1,8000
Spath, pesant	4,43	Phosphore, environ	1,77
Sélénium	4,32	Alun	1,7200
Rubis oriental	4,2833	Houille compacte	1,3292
Topaze orientale	4,0107	Jaïet	1,2592
Saphir oriental	3,9941	Succin	1,0780
Alumine naturelle	3,9	Résine	1,7

Camphre	0,986	Orme rouge	0,800
Sodium	0,9726	Pommier	0,733
Cire	0,97	Bois d'oranger	0,705
Poudre de guerre	0,95	Sapin jaune	0,657
Beurre	0,94	Tilleul	0,604
Glace fondante	0,9300	Bois de cyprès	0,598
Caoutchouc	0,925	Bois de cèdre	0,561
Potassium	0,8651	Peuplier blanc d'Espagne	0,529
Hêtre	0,852	Bois de sassafras	0,482
Frêne	0,845	Peuplier ordinaire	0,383
If	0,807	Liége	0,240

DENSITÉ DE DIVERS CORPS SOLIDES DÉTERMINÉE PAR LE POIDS DU MÈTRE CUBE

D'après M. Poncelet.

Pierre à plâtre	2,168	Sable terreux	1,700
Gypse ou plâtre fin	2,264	Terre végétale légère	1,400
Pierre meulière	2,484	Terre argileuse	1,600
Marbre noir et blanc	2,717	Terre glaise	1,900
Briques les plus cuites	2,200	Maçonnerie de moellons,	1,700 à 2,300
Briques les moins cuites	1,500	Chêne le plus pesant, le cœur.	1,170
Tuiles ordinaires	2,000	Chêne le plus léger	0,850
Sable pur	1,900		

LIQUIDES.

Mercure (d'après M. Regnault)	13,59593	Eau distillée	1,0000
Acide sulfurique (consistance oléagineuse)	1,843	Vin de Bordeaux	0,9993
Acide azoteux	1,550	Vin de Bourgogne	0,9915
Chloroforme	1,52523	Huile de lin	0,94
Sulfure de carbone	1,293	Huile d'olive	0,9153
Eau de la mer Morte	1,2403	Éther chlorhydrique	0,874
Acide azotique	1,2175	Huile essentielle de térébenthine	0,875
Acide acétique monohydraté, à 18°	1,063	Bitume liquide, dit naphte	0,8475
Eau de la mer	1,0263	Alcool du commerce	0,84
Lait	1,03	Alcool absolu	0,792
		Éther sulfurique	0,736
		Acide cyanhydrique	0,697

GAZ ET VAPEURS A LA TEMPÉRATURE DE 0°, SOUS LA PRESSION 0,76

D'après M. Regnault.

Air	1,0000	Hydrogène	0,0692
Oxygène	1,1056	Chlore	2,4400
Azote	0,9713	Brôme	5,3900

Protoxyde d'azote.....	1,5250	Vapeur d'éther sulfhydrique.	3,1380
Deutoxyde d'azote.....	1,0390	Vapeur d'éther cyanhydrique	1,9021
Oxyde de carbone.....	0,9674	Vapeur de chloroforme.....	5,3000
Acide carbonique.....	1,5290	Liqueur des Hollandais.....	3,4500
Sulfure de carbone.....	2,6325	Éther acétique.....	3,0400
Acide sulfureux.....	2,2470	Vapeur d'acétone.....	2,0220
Acide chlorhydrique.....	1,2474	Vapeur de benzine.....	2,6943
Acide sulfhydrique.....	1,1912	Vapeur d'essence de térébenthine.....	4,6978
Gaz ammoniac.....	0,5894	Vapeur de chlorure phosphoreux.....	4,7445
Hydrogène protocarboné...	0,5527	Vapeur de chlorure arsénieux	6,2510
Hydrogène bicarboné.....	0,9672	Vapeur de chlorure de silicium.....	5,8600
Vapeur d'eau.....	0,6210	Vapeur de chlorure d'étain..	9,2000
Vapeur d'alcool.....	1,5890	Vapeur de chlorure de titane	6,8360
Vapeur d'éther.....	2,5563		
Vapeur d'éther chlorhydrique	2,2350		
Vapeur d'éther bromhydrique	3,7316		

§ II. — TEMPÉRATURE. — THERMOMÈTRES.

5. Lorsqu'un corps s'échauffe, on dit que sa température augmente, qu'elle baisse quand il se refroidit, et que les corps ont la même température lorsque, par leur contact, leur état de chaleur ne change pas, quoiqu'ils puissent alors produire sur nos organes des effets fort différents. On est convenu de mesurer la température par les variations de volume des corps, qui accompagnent toujours les variations de température ; et, comme la température de la glace fondante et celle de l'ébullition de l'eau sont constantes, on est convenu de prendre, pour degré de température, l'accroissement de chaleur correspondant à un accroissement de volume du corps thermométrique égal à $\frac{1}{100}$ de l'accroissement de volume qu'il éprouve en passant de la température de la glace fondante à celle de l'ébullition de l'eau, sous la pression de $0^m,76$. Mais comme tous les corps ne se dilatent pas de la même manière, une même température intermédiaire à celles de la glace fondante et de l'ébullition serait représentée par des nombres différents, lorsqu'on emploierait différentes substances thermométriques. On a donc été obligé de convenir aussi de la nature du corps thermométrique. On a choisi les gaz, attendu que tous se dilatent de la même manière, les effets de la chaleur dans ces corps sont indépendants de leur nature, et doivent être plus simples que quand les corps sont à l'état liquide ou solide. Mais comme le mercure se dilate de la même manière que les gaz dans des limites très-étendues, on peut employer indifféremment l'air ou le mercure. On emploie aussi l'alcool comme substance thermométrique ; mais comme la dilatation de cette substance est très-irrégulière, du moins par rapport à celle du

mercure, on gradue ces instruments en déterminant un grand nombre de points de l'échelle par comparaison avec un thermomètre étalon à mercure.

6. On emploie trois échelles thermométriques différentes : l'échelle centigrade, qui renferme 100 divisions, de la glace fondante à l'ébullition de l'eau ; l'échelle de Réaumur, qui en contient 80 ; enfin, celle de Fahrenheit, qui marque 32° pour la température de la glace fondante et 212° pour celle de l'ébullition. En désignant par C, R et F les indications de ces trois échelles dans la même circonstance, on a évidemment

$$C = \frac{5}{4} R \text{ et } C = (F - 32) \frac{5}{9}.$$

7. Comme il est impossible de se procurer des tubes capillaires parfaitement cylindriques, lorsqu'on veut faire des observations très-exactes, on emploie des tubes divisés en parties d'égale capacité ; on note les indications de l'échelle arbitraire qui correspondent aux températures de la glace fondante et de l'ébullition, et on déduit facilement de ces nombres la température qui correspond à une indication quelconque de l'échelle. Dans toutes les recherches de précision, on vérifie souvent l'indication qui correspond à la glace fondante, attendu qu'elle change, du moins pendant un certain temps, par un travail intérieur du verre.

8. Les thermomètres à air sont formés, comme les thermomètres à mercure, d'un tube très-capillaire, terminé par un réservoir ; mais le tube est ouvert à la partie supérieure, et le réservoir ainsi qu'une partie de la tige contiennent de l'air sec, séparé de l'air extérieur par une bulle de mercure. La tige est divisée en parties d'égale capacité, dont le volume est une fraction connue de celui du réservoir. En désignant par V et V′ les volumes de l'air de l'instrument à la température de la glace fondante et à la température T que l'on veut déterminer, par P et P′ les pressions de l'atmosphère dans ces deux circonstances, et par a le coefficient de dilatation de l'air, on a

$$T = \frac{P'V' - PV}{aPV}.$$

Dans cette formule on a négligé la dilatation du verre, parce qu'elle est 150 fois plus petite que celle de l'air.

9. Il y a dans les thermomètres deux espèces de sensibilité : celle qui fait apprécier de très-petites variations de température, et celle qui permet à ces instruments de se mettre très-promptement en équilibre de température avec le milieu environnant. Pour obtenir la première espèce de sensibilité, il faut donner aux tiges des thermomètres un très-petit diamètre, et aux réservoirs une grande capacité. La dernière

exige au contraire que la masse thermométrique soit très-petite. Ainsi, on ne peut pas réunir dans un même instrument ces deux espèces de sensibilité à un très-haut degré.

10. Lorsqu'il s'agit de mesurer de petites différences de température, on emploie des appareils qui sont composés de deux boules de verre, fixées aux extrémités d'un tube de verre capillaire recourbé sous la forme d'un U. La partie inférieure renferme une bulle d'alcool coloré, ou une longue colonne de ce liquide, qui sépare complétement l'air d'une des boules de celui que renferme l'autre. On conçoit que la plus petite différence de température des deux boules sera manifestée par un mouvement du liquide intermédiaire.

11. *Thermomètres à maxima et à minima.* — Ces instruments sont destinés à conserver la trace du maximum et du minimum de température dans un certain laps de temps. Les plus simples sont disposés comme les thermomètres ordinaires, mais ils sont placés horizontalement; ceux qui sont destinés à indiquer les maxima sont à mercure et renferment un petit cylindre d'acier que le mercure pousse devant lui quand la température s'élève, et qu'il abandonne quand elle baisse; ceux qui doivent indiquer les minima sont à alcool, et leur tige renferme un petit index en émail que le liquide entraîne quand la température baisse, et qu'il abandonne dans sa position quand la température s'élève.

12. *Thermomètres métalliques.* — Tous les instruments dont nous venons de parler sont fondés sur la différence de dilatation des liquides et du verre; on emploie aussi des instruments fondés sur l'inégale dilatation des métaux. Ces appareils sont formés de deux barres de métaux différents, d'inégale longueur, appliquées l'une contre l'autre et fixées par une de leurs extrémités; l'extrémité libre de la plus courte coïncide avec des points de l'autre, variables avec la température. On peut graduer ces appareils comme les thermomètres à mercure, mais les divisions sont très-rapprochées. On augmente ordinairement la dilatation apparente à l'aide d'un ou plusieurs leviers. Ces appareils sont rarement employés.

13. *Mesure des hautes températures.* — Les instruments destinés à la mesure des hautes températures portent le nom de *pyromètres*. Le plus généralement employé est celui de Wedgwood. Il est fondé sur le retrait qu'éprouve l'argile soumise à l'action de la chaleur : ce retrait croît avec la température, mais suivant une loi inconnue et qui varie avec la nature de l'argile; il est dû, jusqu'à une certaine limite, à l'eau que cette matière abandonne; mais au delà il paraît provenir uniquement d'une plus forte agglomération de la matière. Le pyromètre de Wedgwood est composé d'une plaque de cuivre sur laquelle sont fixées deux règles de même métal inclinées entre elles, et entre

lesquelles se placent de petits cônes tronqués en argile qui s'élèvent d'autant plus qu'ils ont éprouvé un plus grand retrait. Les cônes doivent être faits avec la même pâte renfermant la même quantité d'eau, et être recuits à la même température ; Wedgwood a adopté le rouge naissant, et a marqué zéro au point où les cônes s'arrêtent : au delà, 240 divisions sont tracées sur une des règles. Pour reconnaître la température d'un fourneau, on y introduit un des petits cônes d'argile placé dans un creuset ; on le retire quand il en a pris la température, on le laisse refroidir et on le place entre les deux règles en le faisant glisser jusqu'au point le plus élevé qu'il puisse atteindre. Le degré de l'échelle auquel il parvient indique la température. Dans le pyromètre de Wedgwood, le zéro correspond à 580° du thermomètre centigrade, et chaque division à 72°. Ces instruments sont surtout utiles pour reconnaître les variations de température ; ils ne sont employés que dans les fourneaux à poteries.

Le pyromètre est un instrument peu exact et surtout peu comparable ; ses indications dépendent essentiellement de la nature de l'argile employée.

Différentes autres méthodes ont été employées ou proposées pour la détermination des hautes températures.

On peut se servir d'un pyromètre à air dont l'enveloppe est en platine ou en porcelaine imperméable ; cet instrument, décrit dans les traités de physique générale, est le plus exact, il sert à régler et à contrôler tous les autres, mais il est d'un emploi difficile pour les personnes peu exercées.

Pour éviter la perte de gaz qui peut se faire à travers le platine porté à une haute température ainsi que l'extension du métal sous l'influence de la pression intérieure, M. Nobel, ingénieur à Saint-Pétersbourg, introduit le gaz dans le pyromètre à enveloppe de platine à une pression de $^1/_4$ d'atmosphère à 0° ; de cette façon la pression intérieure dans le pyromètre ne devient que de 1 atmosphère $^1/_4$ à 1600°, les indications sont fournies au moyen d'un manomètre Bourdon, convenablement gradué.

On peut se servir aussi de la méthode des capacités calorifiques décrite dans tous les traités de physique. Cette méthode a l'inconvénient d'exiger une expérience spéciale pour la détermination de chaque température.

M. E. Becquerel a proposé l'emploi des courants thermo-électriques obtenus à l'aide d'un couple platine-palladium ; l'intensité du courant, mesurée par un galvanomètre, fournit la température. Cet instrument, outre sa délicatesse, qui le rend peu propre aux usages de la pratique, présente cet inconvénient que l'aimantation des aiguilles peut varier avec le temps, et les indications de l'instrument cessent d'être com-

parables. Ces objections s'appliquent à une modification de l'appareil de M. Becquerel faite par M. Schinz.

M. E. Becquerel a aussi proposé de déduire la température du corps de son état d'incandescence, comparée à celle d'une lampe Carcel ; ici encore la détermination exige des appareils délicats et une grande habitude de l'expérimentation ; c'est encore un appareil peu pratique.

M. Schinz a proposé de déterminer la température intérieure d'un fourneau en se servant d'une méthode empruntée à Péclet, et qui consiste à déterminer la température de la paroi extérieure par un des procédés qu'indique Péclet. La connaissance du coefficient de conductibilité du mur permet, au moyen de la formule que nous avons donnée (977), de déduire la température intérieure, mais ce procédé n'est pas exact en ce qu'il suppose que la température de la paroi interne du fourneau est la même que celle des gaz ou du foyer, ce qui n'est pas vrai, en général.

M. Lamy, professeur à l'École centrale, a construit un pyromètre fondé sur la dissociation du carbonate de chaux ; une certaine quantité de spath calcaire est introduite dans une capacité fermée plongée dans le milieu dont on veut déterminer la température, un tube métallique met cette capacité en communication avec un manomètre, gradué d'une façon spéciale, et dont les indications fournissent immédiatement la température ; la tension de dissociation du carbonate de chaux ne dépendant que de la température, on n'a point en effet à se préoccuper de la variation de volume du réservoir. Ce pyromètre paraît donner de bons résultats pour des températures comprises entre 700° et 1000°.

§ III. — DILATATION DES CORPS.

DILATATION DES CORPS SOLIDES.

14. Le tableau suivant renferme les résultats des expériences faites par plusieurs physiciens. L'unité est la longueur du corps à 0°. Le tableau donne l'accroissement de longueur pour un accroissement de température de 100°. Il est évident que, pour avoir le coefficient de dilatation, c'est-à-dire l'accroissement de longueur pour un accroissement de température de 1°, il suffit de diviser par 100 les nombres du tableau.

DILATATION LINÉAIRE DES CORPS SOLIDES, DE 0° A 100°.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	DILATATION.	
	FRACTIONS décimales.	FRACTIONS ordinaires.
D'après MM. Laplace et Lavoisier.		
Flint-glass anglais	0,00081166	1/1248
Platine (selon Borda)	0,00085655	1/1167
Verre de France avec plomb	0,00807199	1/1147
Tube de verre sans plomb	0,00087572	1/1142
— —	0,00089694	1/1115
— —	0,00089760	1/1114
— —	0,00091750	1/1090
Verre de Saint-Gobain	0,00085089	1/1122
Acier non trempé	0,00107880	1/927
—	0,00107915	1/927
—	0,00107960	1/926
Acier trempé jaune, recuit à 65°	0,00123956	1/807
Fer doux forgé	0,00122045	1/819
Fer rond passé à la filière	0,00123504	1/712
Or de départ	0,00146606	1/682
Or au titre de Paris, recuit	0,00151361	1/661
— — non recuit	0,00155155	1/645
Cuivre	0,00171220	1/584
—	0,00171733	1/582
—	0,00172240	1/581
Cuivre jaune ou laiton	0,00186670	1/535
— —	0,00187821	1/533
— —	0,00188970	1/529
Argent au titre de Paris	0,00190868	1/524
Argent de coupelle	0,00190974	1/524
Étain des Indes ou de Malacca	0,00193765	1/516
Étain de Falmouth	0,00217298	1/462
Plomb	0,00284836	1/351
D'après Smeaton.		
Verre blanc (tubes de baromètre)	0,00083333	1/1175
Régule martial d'antimoine	0,00108333	1/923
Acier	0,00115000	1/870
Acier trempé	0,00122500	1/816
Fer	0,00125833	1/795
Bismuth	0,00139167	1/719
Cuivre rouge battu	0,00170000	1/588
Cuivre rouge 8 parties, étain 1	0,00181667	1/550
Cuivre jaune fondu	0,00187500	1/533
Cuivre jaune 16 parties, étain 1	0,00190833	1/524
Fil de laiton	0,00193333	1/517
Métal de miroir de télescope	0,00193333	1/517
Soudure, cuivre 2 parties, zinc 1	0,00205833	1/486
Étain fin	0,00228333	1/438
Étain en grains	0,00248333	1/403
Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2	0,00250533	1/399
Zinc, 8 parties, étain 1, un peu forgé	0,00269167	1/372
Plomb	0,00286667	1/349
Zinc	0,00294167	1/340
Zinc allongé au marteau de 1/12	0,00310833	1/322

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	DILATATION.	
	FRACTIONS décimales.	FRACTIONS ordinaires.
D'après le major général Roy.		
Verre en tube	0,00077550	1/1289
Verre en verge solide	0,00080834	1/1237
Fer fondu (prisme de)	0,00111000	1/901
Acier (verge d')	0,00114450	1/874
Cuivre jaune de Hambourg	0,00185550	1/539
Cuivre jaune anglais, en forme de verge	0,00189296	1/528
Cuivre jaune anglais, en forme d'auge ou canal rectangulaire	0,00189450	1/528
D'après M. Troughton.		
Platine	0,00099180	1/1008
Acier	0,00118990	1/840
Fer tiré à la filière	0,00144010	1/694
Cuivre	0,00191880	1/521
Argent	0,00208260	1/480
D'après Wollaston.		
Palladium	0,00100000	1/1000
D'après MM. Dulong et Petit.		
Platine, de 0° à 100	0,00088120	1/1103
— de 0° à 300	0,00091827	1/1089
Verre, de 0° à 100	0,00086133	1/1161
— de 0° à 200	0,00094836	1/1032
— de 0° à 300	0,00101084	1/987
Fer, de 0° à 100	0,00118210	1/846
— de 0° à 300	0,00146842	1/681
Cuivre, de 0° à 100	0,00171820	1/582
— de 0° à 300	0,00188324	1/531

15. Laplace et Lavoisier ont reconnu que les dilatations d'un même corps étaient uniformes de 0° à 100°, c'est-à-dire que, pour un même nombre de degrés compris dans ces limites, la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur primitive.

Cependant MM. Petit et Dulong ont trouvé que, pour un même nombre de degrés, la dilatation croissait avec la température, comptée sur le thermomètre à air. A la vérité, cet accroissement est presque inappréciable dans les limites de 0° à 100° ; mais de 0° à 300 il est assez considérable comme on peut le voir par le tableau précédent.

16. L'accroissement de surface qu'un corps éprouve par son échauffement est sensiblement égal au double de l'accroissement linéaire, et l'accroissement de volume au triple de cet accroissement; de sorte qu'en désignant par L, S et V la longueur, la surface et le volume d'un

corps à 0°, par L', S' et V', la longueur, la surface et le volume du même corps à t°, et enfin par δ la dilatation linéaire pour 1°, on a

$$L' = L(1 + \delta t); \quad S' = S(1 + 2\delta t); \quad V' = V(1 + 3\delta t).$$

17. Un corps creux d'une matière homogène, augmente de volume par l'accroissement de température de la même quantité que s'il était plein.

DILATATION DES LIQUIDES.

18. D'après les expériences de M. Dulong, les dilatations de l'air et du mercure sont les mêmes jusqu'à 100°; mais, en partant du nouveau coefficient de dilatation de l'air, l'identité va plus loin; car si un thermomètre à mercure indiquait 360°, un thermomètre à air, dans les mêmes circonstances, indiquerait 350°. Ainsi on peut sans erreur sensible admettre que les thermomètres à air et à mercure s'accordent jusqu'aux températures les plus élevées.

Le coefficient de dilatation du mercure est de $\frac{1}{5550}$.

Le coefficient de dilatation apparent du mercure dans le verre est de $\frac{1}{6480}$.

19. Les dilatations des autres liquides, relativement à celles du mercure, sont très-irrégulières. L'eau a un maximum de densité qui correspond à 4°.

20. Le tableau suivant donne les densités et le volume de l'eau, à toutes les températures depuis — 9° jusqu'à 100°, le volume à 4° étant 1.

21. TABLEAU DES VOLUMES ET DES DENSITÉS DE L'EAU

DEPUIS — 9° JUSQU'A 100°.

D'après M. Despretz.

TEMPÉRAT.	VOLUMES.	DENSITÉS.	TEMPÉRAT.	VOLUMES.	DENSITÉS.
— 9°	1,0016311	0,998371	46°	1,01020	0,989903
— 8	1,0013734	0,998628	47	1,01067	0,989442
— 7	1,0011354	0,998865	48	1,01109	0,989032
— 6	1,0009184	0,999082	49	1,01157	0,988562
— 5	1,0006987	0,999302	50	1,01205	0,988093
— 4	1,0005619	0,999437	51	1,01248	0,987674
— 3	1,0004222	0,999577	52	1,01297	0,987196
— 2	1.0003077	0,999692	53	1,01345	0,986728
— 1	1,0002138	0,999786	54	1,01395	0,986243
0	1,0001269	0,999873	55	1,01445	0,985756
1	1,0000730	0,999927	56	1,01495	0,985270
2	1,0000331	0,999966	57	1,01547	0,984766
3	1,0000083	0,999999	58	1,01597	0,984281
4	1,0000000	1,000000	59	1,01647	0,983798
5	1.0000082	0,999999	60	1,01698	0,983303
6	1,0000309	0,999969	61	1,01752	0,982782
7	1,0000708	0,999929	62	1,01809	0,982231
8	1,0001216	0,999878	63	1,01862	0,981720
9	1,0001879	0,999812	64	1,01913	0,981229
10	1,0002684	0,999731	65	1,01967	0,980709
11	1,0003598	0,999640	66	1,02025	0,980152
12	1,0004724	0,999527	67	1,02085	0,979576
13	1,0005862	0,999414	68	1,02144	0,979010
14	1,0007146	0,999285	69	1,02200	0,978473
15	1,0008751	0,999125	70	1,02255	0,977947
16	1,0010215	0,998979	71	1,02315	0,977373
17	1,0012067	0,998794	72	1,02375	0,976800
18	1,00139	0,998612	73	1,02440	0,976181
19	1,00158	0 998422	74	1,02499	0,975619
20	1,00179	0,998213	75	1,02562	0,975018
21	1,00200	0,998004	76	1,02631	0,974364
22	1,00222	0,997784	77	1,02694	0,973766
23	1,00244	0,997566	78	1,02761	0,973132
24	1,00271	0,997297	79	1,02823	0,972545
25	1,00293	0,997078	80	1,02885	0,971959
26	1,00321	0,996800	81	1,02954	0,971307
27	1,00345	0,996562	82	1,03022	0,970666
28	1,00374	0,996274	83	1,03090	0,970027
29	1,00403	0,995986	84	1,03156	0,969405
30	1,00433	0,995688	85	1,03225	0,968757
31	1,00463	0,995391	86	1,03293	0,968120
32	1,00494	0,995084	87	1,03361	0,967482
33	1,00525	0,994777	88	1 03430	0,966837
34	1,00555	0,994480	89	1,03500	0,966183
35	1,00593	0,994104	90	1,03566	0,965567
36	1,00624	0,993799	91	1,03639	0,964887
37	1,00661	0,993433	92	1,03710	0,964227
38	1,00699	0,993058	93	1,03782	0,963558
39	1,00734	0,992713	94	1,03852	0,962908
40	1,00773	0,992329	95	1,03925	0,962232
41	1,00812	0,991945	96	1,03999	0,961547
42	1,00853	0,991542	97	1,04077	0,960827
43	1,00894	0,991139	98	1,04153	0,960125
44	1,00938	0,990707	99	1,04228	0,959434
45	1,00985	0,990246	100	1,04315	0,958634

DILATATION DE DIFFÉRENTS LIQUIDES.

DILATATION APPARENTE DANS LE VERRE POUR 1°.

Eau	1/2200 = 0,000466
Acide chlorhydrique (densité 1,137)	1/1700 = 0,000600
Acide azotique (densité 1,400)	1/900 = 0,001100
Acide sulfurique (densité 1,850)	1/1700 = 0,000600
Éther sulfurique	1/1400 = 0,000700
Huile d'olive et de lin	1/1200 = 0,000800
Essence de térébenthine	1/1400 = 0,000700
Eau saturée de sel marin	1/2000 = 0,000500
Alcool	1/900 = 0,001100
Mercure	1/6480 = 0,000154

DILATATION ABSOLUE POUR 1°.

Mercure de 0° à 100° (Dulong et Petit)	1/5550 = 0,000180180
Mercure de 100° à 200° —	1/5425 = 0,000184331
Mercure de 200° à 300° —	1/5300 = 0,000188679
Mercure de 0° à 100° (M. Regnault)	1/5512 = 0,000181530

DILATATION DES GAZ.

22. Tous les gaz se dilatent uniformément, du moins à partir des températures suffisamment éloignées de celles qui correspondent à leur liquéfaction. Ainsi en désignant par V_0 le volume d'un gaz à 0°; par V, son volume à t° on a :

$$V = V_0(1 + at).$$

23. La valeur de a serait égale, d'après Gay-Lussac, à 0,00375, d'après Rudberg à 0,00364. D'après M. Regnault, elle varie un peu avec la nature des gaz; pour l'air elle est égale à 0,003670 quand la pression ne change pas, et à 0,003665 quand le volume reste constant.

24. TABLEAU DE LA DILATATION ABSOLUE DE QUELQUES GAZ DE 0° A 100°.

D'après M. Regnault.

DÉSIGNATION DES GAZ.	DILATATION	
	SOUS VOLUME constant.	SOUS PRESSION constante.
Air atmosphérique	0,3665	0,3670
Hydrogène	0,3667	0,3661
Azote	0,3668	
Oxyde de carbone	9,3667	0,3669
Acide carbonique	0,3688	0,3710
Protoxyde d'azote	0,3676	0,3719
Acide sulfureux	0,3845	0,3903
Cyanogène	0,3829	0,3877

25. TABLEAU DE LA DILATATION DE L'AIR ET DE L'ACIDE CARBONIQUE

A DIFFÉRENTES PRESSIONS, SOUS UN VOLUME CONSTANT, DE 0° A 100°.

PRESSION EN MILLIMÈTRES DE MERCURE		RAPPORT	COEFFICIENT
A 0°.	A 100°.	DES DENSITÉS A 0°.	DE DILATATION.
AIR ATMOSPHÉRIQUE.			
109,72	149,01	0,1444	0,36482
174,36	237,17	0,2294	0,36513
266,06	395,07	0,3501	0,36542
374,67	510,35	0,4930	0,36587
375,23	510,97	0,4937	0,36572
760,00		1,0000	0,36650
1678,10	2286,09	2,2084	0,36760
1692,53	2306,23	2,2270	0,36800
2144,18	2924,04	2,8213	0,36894
3655,56	4982,09	4,8100	0,37091
ACIDE CARBONIQUE.			
758,47	1014,54	1,0000	0,36856
901,09	1230,37	1,1879	0,36943
1741,73	2387,72	2,2976	0,37523
3589,07	4759,03	4,7318	0,38598

26. DILATATION DE QUELQUES GAZ A DIFFÉRENTES PRESSIONS.

LA PRESSION RESTANT CONSTANTE.

DÉSIGNATION DES GAZ.	PRESSION EN MILLIM. DE MERCURE.	COEFFICIENT DE DILATATION.
Air atmosphérique.	760	0,0036706
	2525	0,0036944
	2620	0,0036964
Hydrogène.	760	0,0036613
	2545	0,0036616
Acide carbonique.	760	0,0037099
	2520	0,0038455
Acide sulfureux.	760	0,003902
	980	0,003980

§ IV. — CHALEURS SPECIFIQUES.

CHALEUR SPÉCIFIQUE DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

27. La chaleur spécifique d'un corps solide ou liquide est le nombre d'unités de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme de ce corps.

28. Le tableau suivant donne la chaleur spécifique de quelques corps d'après divers physiciens.

CHALEURS SPÉCIFIQUES DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	CHALEUR SPÉCIFIQUE.	OPÉRATEURS.
Fer	0,11379	M. Regnault.
Zinc	0,09555	—
Cuivre	0,09515	—
Argent	0,05701	—
Arsenic	0,08140	—
Plomb	0,03140	—
Bismuth	0,03084	—
Antimoine	0,05077	—
Étain des Indes	0,05623	—
— anglais	0,05695	—
Nickel	0,10863	—
Cobalt	0,10696	—
Platine laminé	0,03243	—
— en mousse	0,03293	—
Palladium	0,05927	—
Or	0,03244	—
Soufre	0,20259	—
Acier Haussmann	0,11848	—
Fine-metal	0,12728	—
Fonte de fer blanche de Bourg	0,12983	—
Charbon	0,24111	—
Manganèse très-carburé	0,14411	—
Mercure	0,03332	—
Alliage 1 at. de plomb et 1 at. étain	0,04073	—
— 1 at. de plomb, 2 at. étain	0,04506	—
— 1 at. de plomb, 1 at. antimoine	0,03880	—
— 1 at. bismuth, 1 at. étain	0,04000	—
— 1 at. bismuth, 2 at. étain	0,04504	—
— 1 at. bismuth, 2 at. étain, 1 at. antimoine	0,04621	—
Alliage 1 at. bismuth, 2 at. étain, 1 at. antimoine, 2 at. zinc	0,05657	—
Alliage 1 at. plomb, 2 at. étain, 1 at. bismuth.	0,04476	—
— 1 at. plomb, 2 at. étain, 2 at. bismuth.	0,06082	—
— 1 at. mercure, 1 at. étain	0,07294	—
— 1 at. mercure, 2 at. étain	0,06591	—
— 1 at. mercure, 1 at. plomb	0,03827	—
Protoxyde de plomb, en poudre	0,05118	—
— — fondu	0,05089	—
— de manganèse	0,15701	—
Oxyde de cuivre	0,14201	—
— de nickel	0,16234	—
Magnésie	0,24391	—
Oxyde de zinc	0,12480	—
Peroxyde de fer (fer oligiste)	0,16695	—
Colcothar peu calciné	0,17569	—
— calciné une deuxième fois	0,17167	—
— fortement calciné	0,16921	—
— — — une deuxième fois	0,16707	—
Acide arsénieux	0,12786	—
Oxyde de chrome	0,17960	—
— de bismuth	0,06053	—
— d'antimoine	0,09009	—
Alumine (corindon)	0,19762	—
Saphir	0,21732	—
Acide stannique	0,09326	—
— — artificiel	0,17164	—
— — (rutile)	0,17032	—
— antimonieux	0,09535	—

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	CHALEUR SPÉCIFIQUE.	OPÉRATEURS.
Acide tungstique	0,07983	M. Regnault.
— molybdique	0,13240	—
— silicique	0,19132	—
— borique	0,23743	—
Oxyde de fer magnétique	0,16780	—
Protosulfure de fer	0,13570	—
Sulfure de nickel	0,12818	—
— de zinc	0,12303	—
— de plomb	0,05086	—
— de mercure	0,05117	—
Protosulfure d'étain	0,08365	—
Sulfure d'antimoine	0,08403	—
— de bismuth	0,06002	—
Bisulfure de fer	0,13009	—
— d'étain	0,11932	—
Sulfure de cuivre	0,12118	—
— d'argent	0,07460	—
Pyrite magnétique	0,16023	—
Chlorure de sodium	0,21401	—
— de potassium	0,17295	—
Protochlorure de mercure	0,05205	—
— de cuivre	0,13827	—
Chlorure d'argent	0,09109	—
— de baryum	0,08957	—
— de strontium	0,11990	—
— de calcium	0,16420	—
— de magnésium	0,19460	—
— de plomb	0,06641	—
Protochlorure de mercure	0,06889	—
Chlorure de zinc	0,13618	—
Perchlorure d'étain	0,10161	—
Chlorure de manganèse	0,14255	—
Chloride d'étain	0,14759	—
Fluorure de calcium	0,21492	—
Nitrate de potasse	0,23875	—
— de soude	0,27821	—
— d'argent	0,14352	—
— de baryte	0,15228	—
Chlorate de potasse	0,20956	—
Phosphate de potasse	0,19102	—
— de soude	0,27833	—
— de plomb	0,08208	—
— —	0,07982	—
Arséniate de potasse	0,15631	—
— de plomb	0,07280	—
Sulfate de potasse	0,19010	—
— de soude	0,23115	—
— de baryte	0,11285	—
— de strontiane	0,14279	—
— de plomb	0,08728	—
— de chaux	0,19656	—
— de magnésie	0,22159	—
Chromate de potasse	0,18505	—
Bichromate de potasse	0,18937	—
Borate de potasse	0,21975	—
— de soude	0,23823	—
— de plomb	0,11409	—
de potasse	0,20178	—
— de soude	0,25709	—
— de plomb	0,09046	—
Carbonate de potasse	0,21623	—

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	CHALEUR SPÉCIFIQUE.	OPÉRATEURS.
Carbonate de soude	0,27275	M. Regnault.
— chaux (*spath d'Islande*)	0,20858	—
Aragonite	0,20850	—
Marbre saccharoïde gris	0,20989	—
Craie blanche	0,21485	—
Carbonate de baryte	0,11038	—
— de strontiane	0,14483	—
— de fer	0,19345	—
— de plomb	0,08596	—
Dolomie	0,21743	—
Noir animal	0,26085	—
Charbon de bois	0,24150	—
Coke du cannel-coal	0,20307	—
— de la houille	0,20085	—
Charbon de l'anthracite du pays de Galles	0,20172	—
— — de Philadelphie	0,20100	—
Graphite naturel	0,20187	—
— des hauts fourneaux	0,49702	—
— des cornues du gaz	0,20360	—
Diamant	0,14687	—
Chaux vive	0,2169	Laplace et Lavoisier.
Huile d'olive	0,3096	—
Acide sulfurique (densité, 1,87)	0,3346	—
— nitrique (densité, 1,30)	0,6614	—
Vinaigre	0,920	Dalton.
Acide hydrochlorique	0,600	—
Alcool (densité, 0,81)	0,700	—
— (densité, 0,793)	0,622	—
Éther sulfurique (densité, 0.76)	0,660	—
— — (densité 0,715)	0,520	Despretz.
Essence de térébenthine (densité 0,872)	0,472	—
Bois de pin	0,650	Mayer.
— de chêne	0,570	—
— de poirier	0,500	—
Flint-glass	0,190	Dalton.
Chlorure de sodium	0,230	—
Fer de 0° à 100°	0,1098	Petit et Dulong.
— de 0 à 200	0,1150	—
— de 0 à 300	0,1218	—
— de 0 à 350	0,1255	—
Mercure de 0 à 100	0,0330	—
— de 0 à 300	0,0350	—
Platine de 0 à 100	0,0335	—
— de 0 à 300	0,0355	—
Antimoine de 0 à 100	0,0507	—
— de 0 à 300	0,0547	—
Argent de 0 à 100	0,0557	—
— de 0 à 300	0,0611	—
Zinc de 0 à 100	0,0927	—
— de 0 à 300	0,1015	—
Cuivre de 0 à 100	0,0940	—
— de 0 à 300	0,1013	—
Verre de 0 à 100	0,1770	—
— de 0 à 300	0,1900	—
Platine à 100	0,03350	Pouillet.
— à 300	0,03434	—
— à 500	0,03518	—
— à 700	0,03600	—
— à 1000	0,03718	—
— à 1200	0,03818	—

29. La chaleur spécifique d'un même corps augmente avec la température, surtout lorsqu'il s'approche de la température à laquelle il commence à se ramollir ; elle varie aussi avec l'état d'agrégation des molécules, et elle est d'autant plus petite que cette agrégation est plus grande.

30. M. Regnault a reconnu, à la suite des nombreuses expériences dont nous venons de donner les résultats, que :

1° Pour les métaux, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse de leurs poids atomiques.

2° Il en est de même pour les groupes de corps de même composition et de constitution chimique semblable.

3° La chaleur spécifique d'un alliage est sensiblement égale à la moyenne de celles des métaux alliés.

31. Pour la chaleur spécifique de l'eau aux diverses températures, M. Regnault a donné le tableau suivant :

DEGRÉS du thermomètre à air.	CHALEUR spécifique de l'eau de T° à (T + dT°).	CHALEUR spécifique moyenne de l'eau entre 0° et T°.	DEGRÉS du thermomètre à air.	CHALEUR spécifique de l'eau de T° à (T + dT°).	CHALEUR spécifique moyenne de l'eau entre 0° et T°.
0	1,0000	»	120	1,0177	1,0067
10	1,0005	1,0002	130	1,0204	1,0076
20	1,0012	1,0005	140	1,0232	1,0087
30	1,0020	1,0009	150	1,0262	1,0097
40	1,0030	1,0013	160	1,0294	1,0109
50	1,0042	1,0017	170	1,0328	1,0121
60	1,0056	1,0023	180	1,0364	1,0133
70	1,0072	1,0030	190	1,0401	1,0146
80	1,0089	1,0035	200	1,0440	1,0160
90	1,0109	1,0042	210	1,0481	1,0174
100	1,0130	1,0050	220	1,0524	1,0189
110	1,0153	1,0058	230	1,0568	1,0204

CHALEURS SPÉCIFIQUES DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

32. On peut la considérer sous deux points de vue différents : 1° quand la pression reste la même et que le gaz, en s'échauffant, peut se dilater ; 2° lorsque le volume est constant, et que la force élastique augmente avec la température. La chaleur spécifique sous pression constante est la seule qui se rapporte à la définition donnée pour celle des corps solides ou liquides. C'est aussi la seule qui se soit prêtée jusqu'ici à une détermination expérimentale directe.

33. D'après les travaux de M. Regnault, la chaleur spécifique de l'air, sous pression constante, est :

Entre — 30° et + 10°..... 0,2377
Entre + 10° et 100°..... 0,2379
Entre + 109° et 225°..... 0,2376

La température serait donc sans influence sensible; il paraît en être de même de la pression, depuis une jusqu'à dix atmosphères. Les expériences faites sur plusieurs autres gaz ont conduit M. Regnault à des conclusions analogues.

34. TABLEAU DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

D'après M. Regnault.

DÉSIGNATION DES GAZ.	CHALEURS SPÉCIFIQUES	
	EN POIDS.	EN VOLUME.
GAZ SIMPLES.		
Oxygène	0,2182	0,2412
Azote	0,2440	0,2370
Hydrogène	3,4046	0,2356
Chlore	0,1214	0,2962
Brôme	0,05518	0,2992
GAZ COMPOSÉS.		
Protoxyde d'azote	0,2238	0,3413
Deutoxyde d'azote	0,2315	0,2406
Oxyde de carbone	0,2479	0,2399
Acide carbonique	0,2164	0,3308
Sulfure de carbone	0,1575	0,4146
Acide sulfureux	0,1553	0,3489
— chlorhydrique	0,1845	0,2302
— sulfhydrique	0,2423	0,2886
Gaz ammoniac	0,5080	0,2994
Hydrogène protocarboné	0,5929	0,3277
— bicarboné	0,3694	0,3572
Vapeur d'eau	0,4750	0,2950
— d'alcool	0,4513	0,7171
— d'éther	0,4810	1,2296
— — chlorhydrique	0,2737	0,6117
— — bromhydrique	0,1816	0,6777
— — sulfhydrique	0,4005	1,2568
— — cyanhydrique	0,4255	0,8293
— de chloroforme	0,1568	0,8310
Liqueur des Hollandais	0,2293	0,7911
Éther acétique	0,4008	1,2184
Vapeur d'acétone	0,4125	0,8341
— de benzine	0,3754	1,0114
Essence de térébenthine	0,5061	2,3776
Vapeur de chlorure phosphoreux	0,1346	0,6386
— — arsénieux	0,1122	0,7013
— — de silicium	0,1329	0,7788
— — d'étain	0,0939	0,8639
— — de titane	0,1263	0,8634

35. Le nombre 0,475, donné pour la chaleur spécifique de la vapeur d'eau, n'est guère que la moitié de celui qu'avaient trouvé Delaroche et Berard ; il est remarquable que la chaleur spécifique de la vapeur d'eau soit à peu près égale à celle de la glace et seulement la moitié de celle de l'eau.

§ V. — CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS.

TEMPÉRATURE DE FUSION DES CORPS.

36. Lorsqu'un corps solide passe à l'état liquide sous l'influence d'un foyer de chaleur, il s'échauffe jusqu'à la température de la fusion; mais arrivée à ce terme, la température reste constante jusqu'à la fusion totale.

Le tableau suivant donne les températures de la fusion de différents corps en degrés centigrades, d'après M. Pouillet.

TABLEAU DES TEMPÉRATURES DE FUSION.

Mercure	— 39°	Plomb	320°
Essence de térébenthine	— 10	Zinc	360
Glace	0,0	Antimoine	432
Suif	33,33	Bronze	900
Phosphore	43	Argent très-pur	1000
Stéarine	43 à 49	Or, au titre des monnaies	1180
Acide acétique	45	Or très-pur	1250
Sperma-ceti	49	Fonte blanche très-fusible	1050
Acide margarique	55 à 60	Fonte blanche peu fusible	1100
Potassium	58	Fonte grise très-fusible	1100
Cire non blanchie	61	Fonte grise, deuxième fusion	1200
Cire blanche	68	Fonte manganésée	1250
Sodium	90	Aciers les plus fusibles	1300
Iode	107	Aciers les moins fusibles	1400
Soufre	115	Fer doux français	1500
Étain	230	Fer martelé anglais	1600
Bismuth	262		

CHALEUR LATENTE DE FUSION.

37. Lorsqu'un corps passe de l'état solide à l'état liquide, il absorbe une certaine quantité de chaleur sans que sa température augmente. Cette chaleur absorbée se dégage, lorsque le liquide se solidifie. Elle a reçu le nom de chaleur latente de fusion.

38. **TABLEAU DES CHALEURS LATENTES DE FUSION DE QUELQUES CORPS.**

D'après M. Person.

	TEMPÉRAT. de FUSION.	CHALEUR latente DE FUSION.		TEMPÉRAT. de FUSION.	CHALEUR latente DE FUSION.
Eau	0°	79,25	Étain	235°0	14,25
Phosphore	44,2	5,03	Bismuth	270,5	12,64
Soufre	115,0	9,37	Plomb	334,0	5,37
Azotate de soude	310,5	62,98	Zinc	433,3	28,13
— de potasse	339,0	47,37	Cadmium	328,0	13,58
Chlorure de calcium	28,5	40,70	Argent	»	21,07
Phosphate de soude	36,1	66.80			

TEMPÉRATURE DE L'ÉBULLITION.

39. Lorsqu'un liquide renfermé dans un vase ouvert est soumis à l'action d'un foyer de chaleur, le liquide s'échauffe ; la surface émet une quantité croissante de vapeurs dont la force élastique augmente avec la température et finit par devenir égale à la pression atmosphérique ; alors les vapeurs se forment dans l'intérieur même de la masse liquide et s'élèvent en bulles qui viennent crever à la surface. Ce phénomène a été nommé *ébullition*. Lorsqu'un liquide est en ébullition, la température reste constante jusqu'à ce que toute la masse soit évaporée. Ce phénomène est analogue à celui que présente la fusion des corps solides.

40. Le tableau suivant donne les températures de l'ébullition de différents corps sous la pression de $0^m,76$.

TABLEAU DES TEMPÉRATURES DE L'ÉBULLITION.

Éther sulfurique	37°8
Sulfure de carbone	47,0
Alcool	79,7
Dissolution saturée de sulfate de soude	100,7
— d'acétate de plomb	102,0
— de chlorure de sodium	106,9
— de chlorhydrate d'ammoniaque	114,4
— de nitre	115,6
— de tartre	116,7
— de nitrate d'ammoniaque	125,3
— de sous-carbonate de potasse	140,0
Essence de térébenthine	157,0
Phosphore	290,0
Soufre	299,0
Acide sulfurique	310,0
Huile de lin	316,0
Mercure	360,0

CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION.

41. Les liquides, en se transformant en vapeur, absorbent une certaine quantité de chaleur qui reste latente dans la vapeur, et qui est restituée quand la vapeur se condense. C'est ce qu'on appelle chaleur latente de vaporisation. Le tableau suivant donne, d'après M. Despretz, la chaleur latente de quelques vapeurs, et la quantité totale de chaleur nécessaire pour porter la température de quelques liquides de 0° à l'ébullition, et les vaporiser.

	CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION.	CHALEUR TOTALE.
Eau	531	631
Alcool	207	255
Éther sulfurique	96,8	109,3
Essence de térébenthine	76,8	149,2

42. D'après M. Regnault, la chaleur latente de la vapeur d'eau varie avec la température de l'ébullition, et la quantité C de chaleur, nécessaire pour faire passer 1 kilogramme d'eau à la température T, et pour la vaporiser à cette température, est donnée par la formule

$$C = A + BT$$

A est un coefficient égal à 606,5 et B un autre coefficient égal à 0,305. Au moyen de cette formule, on a formé le tableau suivant :

CHALEUR TOTALE ET CHALEUR LATENTE DE LA VAPEUR D'EAU A DIVERSES TEMPÉRATURES.

D'après M. Regnault.

TEMPÉRATURE de la vapeur saturée.	CHALEUR TOTALE prise par 1 kil. de vapeur saturée, depuis 0°.	CHALEUR LATENTE.	TEMPÉRATURE de la vapeur saturée.	CHALEUR TOTALE prise par 1 kil. de vapeur saturée, depuis 0°.	CHALEUR LATENTE.
0°	606,5	606,5	120	643,1	522,3
10	609,5	599,5	130	646,1	515,1
20	612,6	592,6	140	649,2	508,0
30	615,7	585,7	150	652,2	500,7
40	618,7	578,7	160	655,3	493,6
50	621,7	571,6	170	658,3	486,2
60	624,8	564,7	180	661,4	479,0
70	627,8	557,6	190	664,4	471,6
80	630,9	550,6	200	667,5	464,3
90	633,9	543,5	210	670,5	456,8
100	637,0	536,5	220	673,6	449,4
110	640,0	529,4	230	676,6	441,9

LIQUÉFACTION ET SOLIDIFICATION DU GAZ.

43. Le plus grand nombre de gaz, soumis à une température assez basse et sous une pression suffisante, finissent par se liquéfier, et quelques-uns même se solidifient. Il est très-probable qu'il en serait de même pour tous, si l'on pouvait abaisser assez la température, ou augmenter la pression.

44. M. Faraday a obtenu, à l'état solide, les gaz renfermés dans le tableau suivant, avec leur température de fusion.

TEMPÉRATURES DE FUSION DE QUELQUES GAZ.

D'après M. Faraday.

Cyanogène	— 35°	Acide sulfureux	— 76°
Acide iodhydrique	— 51	Acide sulfhydrique	— 86
Acide carbonique	— 58	Acide bromhydrique	— 88
Oxyde de chlore	— 60	Protoxyde d'azote	— 100
Ammoniaque	— 75		

45. Les tableaux suivants donnent la température en degrés centigrades, et la pression en atmosphères correspondant à la vaporisation de quelques gaz liquéfiés.

TABLEAU DES TEMPÉRATURES ET DES PRESSIONS

CORRESPONDANT A LA VAPORISATION DES GAZ QUI SE LIQUÉFIENT LE PLUS FACILEMENT.

TEMPÉRATURES.	ACIDE SULFUREUX.	CYANOGÈNE.	AMMONIAQUE.
— 18°	0at,7	1at,2	2at,5
0	1 ,5	2 ,4	4 ,4
+ 4,4	1 ,8	2 ,8	5 ,0
32	4 ,3	6 ,2	11 ,0
38	5 ,1	7 ,3	»

46. Le tableau suivant indique les températures et les pressions qui correspondent à la vaporisation de quelques autres gaz liquéfiés.

TEMPÉRAT.	PRESSIONS EN ATMOSPHÈRES.					
	GAZ oléfiant.	ACIDE carbonique.	PROTOXYDE d'azote.	GAZ chlorhydrique.	GAZ sulfhydrique.	HYDROGÈNE arsenié.
	atm.	atm.	atm.	atm.	atm.	atm.
— 87°2	»	»	1,0	»	»	»
— 78,9	»	1,2	1,4	»	»	»
— 73,3	9,3	1,8	1,8	1,8	1,0	»
— 59,4	»	4,6	3,6	»	»	0,9
— 51,1	13,9	7,1	5,4	5,1	1,9	1,4
— 40,0	17,0	11,1	8,7	7,7	2,9	2,3
— 28,9	21,2	16,3	13,3	10,9	4,2	3,5
— 17,8	27,2	22,8	19,3	15,0	6,1	5,2
— 6,7	36,8	30,7	26,8	21,1	8,4	7,4
— 1,1	42,5	37,2	31,1	25,3	9,9	8,7
+ 2,4	»	»	»	30,7	11,8	10,0

47. A la température de — 110° sous la pression de 27 atmosphères, l'hydrogène et l'oxygène n'ont pu être liquéfiés. — A la même température, l'acide de carbone, sous une pression de 40at, l'azote et le bioxyde d'azote, sous une pression de 50at, n'ont donné aucun signe de liquéfaction.

§ VI. — MÉLANGES RÉFRIGÉRANTS.

48. Certaines actions chimiques produisent des abaissements de températures. Le tableau suivant indique les mélanges employés pour obtenir un froid plus ou moins considérable.

MÉLANGES.	PARTIES.	ABAISSEMENT DE TEMPÉRATURE.	FROID PRODUIT.
Eau	16		
Nitre	5	de + 10° à — 12°	22°
Chlorhydrate d'ammoniaque.	5		
Eau	16		
Chlorhydrate d'ammoniaque.	5		
Nitre	5	de + 10° à — 16°	26
Sulfate de soude	8		
Eau	1	de + 10° à — 16°	26
Azotate d'ammoniaque	1		
Eau	1		
Azotate d'ammoniaque	1	de + 10° à — 19°	29
Sous-carbonate de soude	1		
Eau	4		
Chlorure de potassium	57	de + 10° à — 5°	15
Chlorhydrate d'ammoniaque.	32		
Azotate de potasse	20		
Neige ou glace pilée	2	de + 10° à — 10°	20
Sel marin	1		
Neige ou glace pilée	5		
Sel marin	2	de + 10° à — 14°	24
Sel ammoniac	1		
Neige ou glace pilée	24		
Sel marin	10	de + 10° à — 18°	28
Sel ammoniac	5		
Nitre	5		
Neige ou glace pilée	12		
Sel marin	5	de + 10° à — 21°	31
Azotate d'ammoniaque	5		
Sulfate de soude	3	de + 10° à — 19°	29
Acide azotique étendu d'eau.	2		
Sulfate de soude	6		
Sel ammoniac	4	de + 10° à — 23°	33
Nitre	2		
Acide azotique étendu	4		
Sulfate de soude	6		
Azotate d'ammoniaque	5	de + 10° à — 26°	36
Acide azotique étendu d'eau.	4		
Phosphate de soude	9	de + 10° à — 29°	39
Acide azotique étendu	4		
Sulfate de soude	20	de + 10° à — 8°15	18,15
Acide sulfurique à 36°	16		
Sulfate de soude	22	de + 10° à — 8°	18
Résidu d'éther à 33°	17		
Sulfate de soude	8	de + 10° à — 17°	27
Acide chlorhydrique	5		

§ VII. — TENSION DES VAPEURS.

49. Lorsqu'un espace vide renferme un liquide vaporisable, il se remplit instantanément de toute la vapeur qui peut se former à la tempé-

rature du liquide. Si l'espace augmente, le liquide fournit de nouvelle vapeur, de manière que la force élastique et la densité de la vapeur restent constantes; si l'espace diminue, une certaine partie de la vapeur se condense, de manière à conserver à celle qui reste sa tension et sa densité primitives. Mais cette permanence n'a lieu qu'autant que, dans le premier cas, une source de chaleur fournit au liquide la chaleur employée à la formation des vapeurs; et que, dans le second, l'enveloppe peut absorber et disperser la chaleur qui résulte de la condensation partielle de la vapeur. En admettant les mêmes hypothèses, si l'on élevait ou si l'on abaissait la température du liquide, pendant toutes les variations de l'étendue de l'espace, la vapeur aurait toujours la tension et la densité maximum qui correspondent à la température du liquide.

50. On appelle vapeur saturée, la vapeur qui a le maximum de tension et le maximum de densité correspondant à sa température.

51. Si un espace saturé de vapeurs ne renfermait point de liquide, en supposant que l'enveloppe ne fournît point de chaleur et n'en absorbât point, par l'accroissement du volume de l'espace, la densité, la tension et la température de la vapeur diminueraient; et ces quantités augmenteraient par la diminution de l'espace; il paraît que dans ces deux circonstances la vapeur reste toujours saturée et qu'il n'y a pas de vapeur condensée.

52. En général, une vapeur non saturée se comporte comme un gaz permanent par les variations de température et de pression, pourvu que ces variations ne l'amènent pas à la saturation.

La mesure de la force élastique de la vapeur d'eau saturée à de hautes températures présentait de grandes difficultés et n'était pas sans danger. Jusqu'en 1830, époque de la publication des expériences de MM. Dulong et Arago, on ne connaissait à peu près exactement que les températures correspondant à des pressions inférieures à 8 atmosphères. Dans les expériences de MM. Dulong et Arago, la pression a été portée jusqu'à 24 atmosphères correspondant à une température de 224°,20. Plus récemment, M. Regnault a repris cette question, les pressions se sont élevées jusqu'à 27 $\frac{1}{2}$ atmosphères, correspondant à 230°, et les résultats obtenus, s'accordant autant que le permettent des expériences aussi délicates avec ceux de MM. Dulong et Arago, viennent confirmer le travail si remarquable de ces deux illustres physiciens.

53. Les tableaux suivants renferment la tension de la vapeur d'eau, à différentes températures.

TABLEAU DES FORCES ÉLASTIQUES DE LA VAPEUR D'EAU, DE — 32° A 100°.

D'après M. Regnault.

TEMPÉRAT.	FORCES ÉLASTIQUES en millimètres de mercure.	TEMPÉRAT.	FORCES ÉLASTIQUES en millimètres de mercure.	TEMPÉRAT.	FORCES ÉLASTIQUES en millimètres de mercure.
	mm		mm		mm
— 32°	0,310	+ 13°	11,162	+ 57°	129,251
31	0,336	14	11,908	58	135,505
30	0,365	15	12,699	59	142,015
29	0,397	16	13,536	60	148,791
28	0,431	17	14,421	61	155,839
27	0,468	18	15,357	62	163,170
26	0,509	19	16,346	63	170,791
25	0,553	20	17,391	64	178,714
24	0,602	21	18,495	65	186,945
23	0,654	22	19,659	66	195,496
22	0,711	23	20,888	67	204,376
21	0,774	24	22,184	68	213,596
20	0,841	25	23,550	69	223,165
19	0,916	26	24,988	70	233,093
18	0,998	27	26,505	71	243,393
17	1,084	28	28,101	72	254,073
16	1,179	29	29,782	73	265,147
15	1,284	30	31,548	74	276,624
14	1,398	31	33,406	75	288,517
13	1,521	32	35,359	76	300,838
12	1,656	33	37,411	77	313,600
11	1,803	34	39,565	78	326,811
10	1,963	35	41,827	79	340,488
9	2,137	36	44,201	80	354,643
8	2,327	37	46,691	81	369,287
7	2,533	38	49,302	82	384,435
6	2,758	39	52,039	83	400,101
5	3,004	40	54,906	84	416,298
4	3,271	41	57,910	85	433,041
3	3,644	42	61,055	86	450,344
2	3,879	43	64,346	87	468,221
1	4,224	44	67,790	88	486,687
0	4,600	45	71,391	89	505,759
+ 1	4,940	46	75,158	90	525,450
2	5,302	47	79,093	91	545,778
3	5,687	48	83,204	92	566,757
4	6,097	49	87,499	93	588,406
5	6,534	50	91,982	94	610,740
6	6,988	51	96,661	95	633,778
7	7,492	52	101,543	96	657,535
8	8,017	53	106,636	97	682,029
9	8,574	54	111,945	98	707,280
10	9,165	55	117,478	99	733,305
11	9,792	56	123,244	100	760,000
12	10,457				

54. Le tableau suivant renferme, pour les températures comprises entre 0 et 230°, les tensions correspondantes de la vapeur, le volume occupé par un kilogramme de vapeur et le poids du mètre cube. Les températures ont été mesurées au moyen du thermomètre à air.

TABLEAU DE LA FORCE ÉLASTIQUE,

DU VOLUME ET DE LA DENSITÉ DE LA VAPEUR D'EAU.

TEMPÉR. de la vapeur.	TENSION de la vapeur en prenant l'atmosphère pour unité.	HAUTEUR de la colonne de mercure faisant équilibre à la tension de la vapeur.	HAUTEUR de la colonne d'eau faisant équilibre à la tension de la vapeur.	VOLUME occupé par un kil. de vapeur, en mètres cubes.	POIDS du mètre cube de vapeur.
	atm	m	m	mc	k
0°	1/166 ou 0,0060	0,0046	0,0625	205,22240	0,00487266
5	0,0085	0,0065	0,0884	147,75371	0,00676800
10	0,0133	0,0091	0,1237	107,48908	0,00930320
15	0,0167	0,0127	0,1727	78,35263	0,01276810
17,86	1/60 ou 0,0200	0,0152	0,2067	66,14496	0,01512517
20	0,0229	0,0174	0,2366	58,18440	0,01721000
25	0,0309	0,0235	0,3195	43,81498	0,02281840
29,37	1/25 ou 0,0400	0,0304	0,4134	34,38449	0,02909000
30	0,0414	0,0315	0,4283	33,23320	0,03008428
33,30	1/20 ou 0,0500	0,0380	0,5167	27,85258	0,03590307
35	0,0550	0,0418	0,5684	25,40909	0,03927636
37,38	1/16 ou 0,0625	0,0475	0,6459	22,57831	0,04430600
40	0,0722	0,0549	0,7465	19,70135	0,05075875
42,66	1/12 ou 0,0833	0,0633	0,8607	17,23227	0,05803375
45	0,0939	0,0714	0,9709	15,37885	0,06497714
46,25	1/10 ou 0,1000	0,0760	1,0334	14,51564	0,06892666
50	0,1209	0,0919	1,2496	12,13377	0,08236000
50,60	1/8 ou 0,1250	0,0950	1,2918	11,76950	0,08495800
53,35	1/7 ou 0,1428	0,10857	1,4755	10,39195	0,09622000
55	0,1546	0,11748	1,5975	9,64802	0,10365238
56,63	1/6 ou 0,1666	0,12666	1,7214	8,99644	0,11119230
60	0,1958	0,14879	2,0222	7,73688	0,12923823
60,40	1/5 ou 0,2000	0,15184	2,0657	7,58297	0,13185937
65	0,2460	0,18694	2,5420	6,24774	0,16005555
65,36	1/4 ou 0,2500	0,19000	2,5821	6,15667	0,16240770
70	0,3067	0,23309	3,1695	5,08438	0,19665454
75	0,3796	0,28851	3,9231	4,16858	0,23991111
80	0,4666	0,35464	4,8224	3,43994	0,29072857
81,72	1/2 ou 0,5000	0,38000	5,1642	3,22712	0,30983570
85	0,5697	0,43304	5,8885	2,85644	0,35004166
90	0,6914	0,52545	7,1457	2,28699	0,41892000
92,18	3/4 ou 0,7500	0,57000	7,7463	2,21512	0,45141000
95	0,8339	0,63378	8,6181	2,00605	0,49848777
100	1 ou 1,0000	0,7600	10,3304	1,696000	0,5913
105	1,1926	0,9064	12,3252	1,441136	0,6938857
106,33	1 1/8 ou 1,2500	0,9500	12,9105	1,380541	0,7243000
110	1,4150	1,0754	14,6233	1,230642	0,8125166
111,83	1 1/7 ou 1,5000	1,1400	15,4926	1,161228	0,8567000
115	1,6703	1,2694	17,2613	1,054766	0,9467400
116,50	1 3/8 ou 1,7500	1,3300	18,0747	1,012619	0,9875250
120	1,9622	1,4913	20,2787	0,910674	1,098075
120,64	2 ou 2,0000	1,5200	20,6568	0,895462	1,115717
124,89	2,250	1,7200	23,2389	0,798033	1,253057
125	2,2946	1,7439	23,7135	0,788682	1,267941
127,83	2,500	1,9000	25,8210	0,729463	1,370875
130	2,6714	2,0303	27,6080	0,685943	1,457334
130,98	2,750	2,0900	28,4031	0,668363	1,496207
133,91	3 ou 3,000	2,2800	30,9852	0,616697	1,620384
135	3,0969	2,3537	32,0056	0,599031	1,669346
136,72	3,250	2,4700	33,5673	0,573576	1,743400
139,29	3,500	2,6600	36,1490	0,534694	1,865826
140	3,5758	2,7176	36,9539	0,525188	1,903826

TEMPÉR. de la vapeur.	TENSION de la vapeur en prenant l'atmosphère pour unité.	HAUTEUR de la colonne de mercure faisant équilibre à la tension de la vapeur.	HAUTEUR de la colonne d'eau faisant équilibre à la tension de la vapeur.	VOLUME occupé par un kil. de vapeur, en mètres cubes.	POIDS du mètre cube de vapeur.
	atm	m	m	mc	k
141°72	3,750	2,8500	38,7315	0.503167	1,987318
144	4 ou 4,000	3,0400	41,3130	0,474320	2,108285
145	4,1118	3,1250	42,4937	0,462251	2,163500
146,28	4,250	3,2300	43,8950	0,448860	2,227800
148,44	4,500	3,4200	46,4780	0,426093	2,346833
150	4,7118	3,5810	48,6944	0,408213	2,449666
150,35	4,750	3,6100	49,0600	0,405507	2,466055
152,26	5 ou 5,000	3,8000	51,6420	0,386960	2,584176
154,15	5,250	3,9900	54,2240	0,370170	2,701852
155	5,3789	4,0880	55,5886	0,361807	2,763687
155,94	5,500	4,1800	56,8060	0,354778	2,8122505
157,64	5,750	4,3700	59,3880	0,340669	2,934600
159,25	6 ou 6,000	4,5600	61,9700	0,327779	3,050785
160	6,1197	4,6510	63,2443	0,321724	3,108142
165	6,9394	5,2740	71,6780	0,287055	3,482167
165,40	7 ou 7,0000	5,3200	72,2990	0,284938	3,509307
170	7,8434	5,9610	81,0577	0,256784	3,893666
170,84	8 ou 8,0000	6,0800	82,627	0,252423	3,970636
175	8,8381	6,7170	91,3378	0,230490	4,318500
175,77	9 ou 9,0000	6,840	92,955	0,226771	4,407700
180	9,9289	7,546	102,6105	0,207403	4,820000
180,30	10 ou 10,000	7,600	103,284	0,206248	4,848444
184,60	11 ou 11,0000	8,360	113,612	0,189189	5,283250
185	11,1220	8,4530	114,9439	0,187265	5,340500
188,54	12 ou 12,0000	9,1200	123,941	0,174952	5,714250
190	12,4250	9,443	128,4059	0,169437	5,911428
195	13,816	10,520	143,0510	0,153660	6,504286
200	15,356	11,689	158,9470	0,138717	7,317166
205	17,039	12,956	176,1757	0,127494	7,842800
210	18,842	14,325	194,7913	0,116464	8,581600
215	20,264	15,801	214,8620	0,106716	9,369000
220	22,881	17,390	236,4692	0,097865	10,20628
225	25,118	19,097	259,6810	0,096041	11,09589
230	27,534	20,926	284,5517	0,083115	12,03722

§ VIII. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

55. Lorsqu'on met un liquide dans un vase fermé renfermant un gaz sec, on observe les faits suivants :

1° Les vapeurs ne se forment que lentement, et ce n'est qu'après un temps plus ou moins long que le gaz renferme toute la vapeur qui peut se produire à la température du liquide.

2° La force élastique du mélange saturé de vapeur est égale à la force élastique du gaz augmentée de la tension maximum de la vapeur à cette température, et par conséquent la quantité de vapeur que renferme le gaz est égale à celle qui se produirait à la même température dans le même espace vide.

56. Ainsi les vapeurs se développent dans les gaz comme dans le vide; seulement les gaz opposent à l'évaporation un obstacle mécanique qui la retarde, et le mélange des gaz et des vapeurs s'effectue comme celui des gaz permanents.

57. **POIDS DE LA VAPEUR D'EAU RENFERMÉE DANS UN MÈTRE CUBE D'AIR SATURÉ**

A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES, SOUS LA PRESSION DE $0^m,76$.

TEMPÉRATURE.	POIDS EN GRAMMES.	TEMPÉRATURE.	POIDS EN GRAMMES.
0°	5,2	50°	63,63
5	7,2	55	88,74
10	9,50	60	105,84
15	12,83	65	127,20
20	16,78	70	141,96
25	27,01	75	173,74
30	28,51	80	199,24
35	37,00	85	227,20
40	46,40	90	251,34
45	58,60	95	273,78
50	63,63	100	295

§ IX. — HYGROMÉTRIE.

58. On désigne sous le nom d'état hygrométrique de l'air, le rapport de la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'air, à la quantité maximum qui pourrait s'y trouver si l'air était saturé; ou le rapport de la tension de la vapeur d'eau dans l'air à la tension maximum correspondante à cette température.

59. L'hygromètre de Saussure donne des indications desquelles on peut facilement déduire l'état hygrométrique de l'air, d'après le tableau suivant :

TABLEAU DE LA FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR

CORRESPONDANTE AUX DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE, A LA TEMPÉRATURE DE 10° CENTÉSIMAUX, EXPRIMÉE EN CENTIÈMES DE LA TENSION A LA SATURATION.

TENSION de la vapeur.	DEGRÉS correspondants de l'hygromètre	TENSION de la vapeur.	DEGRÉS correspondants de l'hygromèt.	DEGRÉS de l'hygrom.	TENSIONS correspondantes de la vapeur.	DEGRÉS de l'hygrom.	TENSIONS correspondantes de la vapeur.
0	0,00	51	72,94	0	0,00	51	28,58
1	2,19	52	73,68	1	0,45	52	29,38
2	4,37	53	74,41	2	0,90	53	30,17
3	6,56	54	75,14	3	1,35	54	30,97
4	8,75	55	75,87	4	1,80	55	31,76
5	10,94	56	76,54	5	2,25	56	32,66
6	12,93	57	77,21	6	2,71	57	33,57
7	14,92	58	77,88	7	3,18	58	34,47
8	16,92	59	78,55	8	3,64	59	35,37
9	18,91	60	79,22	9	4,10	60	36,28
10	20,91	61	79,84	10	4,57	61	37,31
11	22,81	62	80,46	11	5,05	62	38,34
12	24,71	63	81,08	12	5,52	63	39,36
13	26,61	64	81,70	13	6,00	64	40,39
14	28,51	65	82,32	14	6,48	65	41,42
15	30,41	66	82,90	15	6,96	66	42,58
16	32,08	67	83,48	16	7,46	67	43,73
17	33,76	68	84,06	17	7,95	68	44,89
18	35,43	69	84,64	18	8,45	69	46,04
19	37,11	70	85,22	19	8,95	70	47,19
20	38,78	71	85,77	20	9,45	71	48,51
21	40,27	72	86,31	21	9,97	72	49,82
22	41,76	73	86,86	22	10,49	73	51,14
23	43,26	74	87,41	23	11,01	74	52,45
24	44,75	75	87,95	24	11,53	75	53,76
25	46,24	76	88,47	25	12,05	76	55,25
26	47,55	77	88,99	26	12,59	77	56,74
27	48,86	78	89,51	27	13,14	78	58,24
28	50,18	79	90,01	28	13,69	79	59,73
29	51,49	80	90,55	29	14,23	80	61,22
30	52,81	81	91,05	30	14,78	81	62,89
31	53,96	82	91,55	31	15,36	82	64,57
32	55,11	83	92,05	32	15,94	83	66,24
33	56,27	84	92,54	33	16,52	84	67,92
34	57,42	85	93,04	34	17,10	85	69,59
35	58,58	86	93,52	35	17,68	86	71,49
36	59,61	87	94,00	36	18,30	87	73,39
37	60,64	88	94,48	37	18,92	88	75,29
38	61,66	89	94,95	38	19,54	89	77,19
39	62,69	90	95,43	39	20,16	90	79,09
40	63,72	91	95,90	40	20,78	91	81,09
41	64,63	92	96,36	41	21,45	92	83,08
42	65,53	93	96,82	42	22,12	93	85,08
43	66,43	94	97,29	43	22,79	94	87,07
44	67,34	95	97,75	44	23,46	95	89,06
45	68,24	96	98,20	45	24,13	96	91,25
46	69,03	97	98,69	46	24,86	97	93,44
47	69,83	98	99,10	47	25,59	98	95,63
48	70,62	99	99,55	48	26,32	99	97,81
49	71,42	100	100,00	49	27,06	100	100,00
50	72,21			50	27,79		

60. Cette table fournit un moyen très-simple de déterminer le poids de la vapeur renfermé dans un volume d'air donné, lorsqu'on connaît la température et le degré de l'hygromètre. En effet, la température de l'air étant connue, le tableau (53) donnera la tension maximum de la vapeur à cette température ; d'où on déduira sa densité, et en multipliant cette densité par la tension de la vapeur correspondant au degré de l'hygromètre, on aura la densité de la vapeur dans l'air. Pour avoir le poids de la vapeur renfermée dans un volume quelconque, il faudra multiplier la densité obtenue par le poids d'un volume d'eau égal au volume donné.

61. Proposons-nous, par exemple, de déterminer le poids de la vapeur d'eau contenue dans 1 mètre cube d'air, à la température de 10° et à 60° de l'hygromètre. La densité maximum de la vapeur à 10° est 0,00000974 ; à 60° de l'hygromètre, sa tension est égale à 0,36 de la tension maximum. Ainsi, la densité de la vapeur dans l'air est $0,00000974 \times 0,36 = 0,0000035$; or, un mètre cube d'eau pèse 1000 kilog. ou 1000000 de grammes. Le poids de la vapeur renfermée dans un mètre cube sera donc $0,0000035 \times 1000000^{gr} = 3^{gr},5$.

62. Rarement, dans les couches inférieures de l'atmosphère, l'hygromètre marque 100°, même quand il pleut. L'indication moyenne dans toutes les saisons de l'année est 72. Ainsi, la quantité de vapeur contenue dans l'air est en moyenne la moitié de celle qui correspond à la saturation. La limite de sécheresse, à la surface de la terre, est de 40°.

TABLE DES MATIÈRES

RENFERMÉES DANS LE PREMIER VOLUME.

LIVRE PREMIER.

De la combustion et des combustibles.

		Pages.
CHAPITRE	I. De la combustion en général	2
—	II. Des combustibles en général	8
—	III. Des bois	19
—	IV. Charbon de bois	30
—	V. Tannée	50
—	VI. Tourbe	56
—	VII. Charbon de tourbe	65
—	VIII. Combustibles fossiles	68
	Lignites	69
	Houilles. — Anthracites	72
—	IX. Du coke	97
—	X. Combustibles liquides	114
—	XI. Combustibles gazeux	116
—	XII. Détermination des volumes d'air nécessaires pour brûler les différents combustibles, et des volumes de gaz qui s'échappent.	118
—	XIII. Températures produites par la combustion de différents combustibles	129

LIVRE II.

Écoulement des gaz comprimés.

CHAPITRE	I. Écoulement des gaz sous de faibles pressions par un orifice en mince paroi	144
—	II. Écoulement des gaz sous de grandes pressions par un orifice en mince paroi	160
—	III. Examen de la formule de M. Navier	165

Pages.

CHAPITRE IV. ÉCOULEMENT PAR DES AJUTAGES CYLINDRIQUES ET CONIQUES..... 177
— V. FROTTEMENT DANS LES TUYAUX DE CONDUITE DE GAZ..... 188
— VI. CHANGEMENTS DE DIRECTION DANS LES TUYAUX DE CONDUITE DE GAZ. 208
— VII. CHANGEMENTS DE SECTION DANS LES TUYAUX DE CONDUITE DE GAZ.. 213
— VIII. ÉCOULEMENT DES GAZ PAR DES TUYAUX D'UNE FORME QUELCONQUE... 224
— IX. PASSAGE DE L'AIR A TRAVERS LES MURS SOUS DE FAIBLES PRESSIONS.. 234
— X. ÉCOULEMENT DE LA VAPEUR SOUS DIFFÉRENTES PRESSIONS..... 239
— XI. ANÉMOMÈTRES ET MANOMÈTRES..... 255

LIVRE III.

Des cheminées.

CHAPITRE I. MOUVEMENT DE L'AIR CHAUD DANS LES TUYAUX VERTICAUX..... 277
— II. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES CHEMINÉES D'USINE..... 292
— III. DIMENSIONS DES CHEMINÉES D'USINE..... 306
— IV. CHEMINÉES D'APPEL..... 319
— V. CONSTRUCTION DES CHEMINÉES..... 321
Cheminées d'usine..... 321
Cheminées d'habitation..... 330
— VI. INFLUENCE DE L'ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE SUR LE TIRAGE DES CHEMINÉES. 335
Influence des vents..... 335
Influence de la température de l'air extérieur..... 338
Influence de la pression de l'atmosphère..... 339
Influence de l'état hygrométrique de l'air..... 339
Influence des rayons solaires..... 341
— VII. APPAREILS DESTINÉS A SOUSTRAIRE LE TIRAGE DES CHEMINÉES A L'INFLUENCE DES VENTS ET DE LA PLUIE..... 342
Appareils pour le sommet des cheminées..... 342
Appareils pour les prises d'air..... 348
— VIII. APPAREILS DESTINÉS A MESURER LE TIRAGE..... 349

LIVRE IV.

Mouvements de l'air produits par des machines ou par des jets de vapeur.

CHAPITRE I. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES APPAREILS VENTILATEURS..... 353
— II. VENTILATEURS A FORCE CENTRIFUGE..... 360
Ventilateurs aspirants..... 360
Ventilateurs soufflants..... 367
Ventilateurs aspirants et soufflants..... 375
Ventilateurs multiples..... 376
— III. VENTILATEURS A VIS..... 376
— IV. ROUES PNEUMATIQUES..... 381
— V. MACHINES A PISTON..... 385
— VI. MACHINES A CLOCHES PLONGEANTES..... 389
— VII. VENTILATION PAR JET DE VAPEUR..... 392

Pages.

CHAPITRE VIII. MACHINES SOUFFLANTES DIVERSES..... 408
— IX. VENTILATION PAR UN TRAVAIL ACCUMULÉ..... 410

LIVRE V.

Des foyers.

CHAPITRE I. DES FOYERS ORDINAIRES A FLAMME DROITE..... 412
— II. DIFFÉRENTES FORMES DE FOYERS..... 424
Foyers à flamme renversée..... 424
Foyers à réverbère..... 428
Foyers à injection d'air sur la flamme..... 428
Foyers doubles combinés..... 436
Foyers avec grilles à gradins, à étages, etc..... 438
Foyers à alimentation continue..... 443
Foyers à injection de vapeur ou d'air sous la grille..... 450
Foyers alimentés par de l'air chaud..... 452
Foyers à gaz..... 453
Foyers dans lesquels les combustibles solides sont d'abord transformés en gaz combustibles. (Gazogènes.)..... 462
Foyers à charbon pulvérisé..... 474
Foyers à goudron..... 476
— III. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES FOYERS..... 480
— IV. FOYERS POUR LES DIVERS COMBUSTIBLES..... 502

LIVRE VI.

Émission et transmission de la chaleur.

CHAPITRE I. ÉMISSION DE LA CHALEUR PAR DES SURFACES MAINTENUES A UNE TEMPÉRATURE CONSTANTE..... 509
Formules générales relatives à l'émission de la chaleur dans l'air..... 519
Influence des enveloppes sur l'émission de la chaleur..... 525
Émission de la chaleur dans l'air par les tuyaux..... 528
— II. TRANSMISSION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES CORPS SOLIDES..... 531
Conductibilité des métaux..... 532
Conductibilité des corps mauvais conducteurs..... 542
— III. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES ET APPLICATIONS DES FORMULES..... 555
Diffusion de la chaleur..... 577
Chauffage intermittent..... 584
Observations sur l'usage des formules..... 586

NOTE.

Tables et renseignements relatifs aux propriétés physiques des corps.

§ I. Densité..... 589
§ II. Température. — Thermomètres..... 592

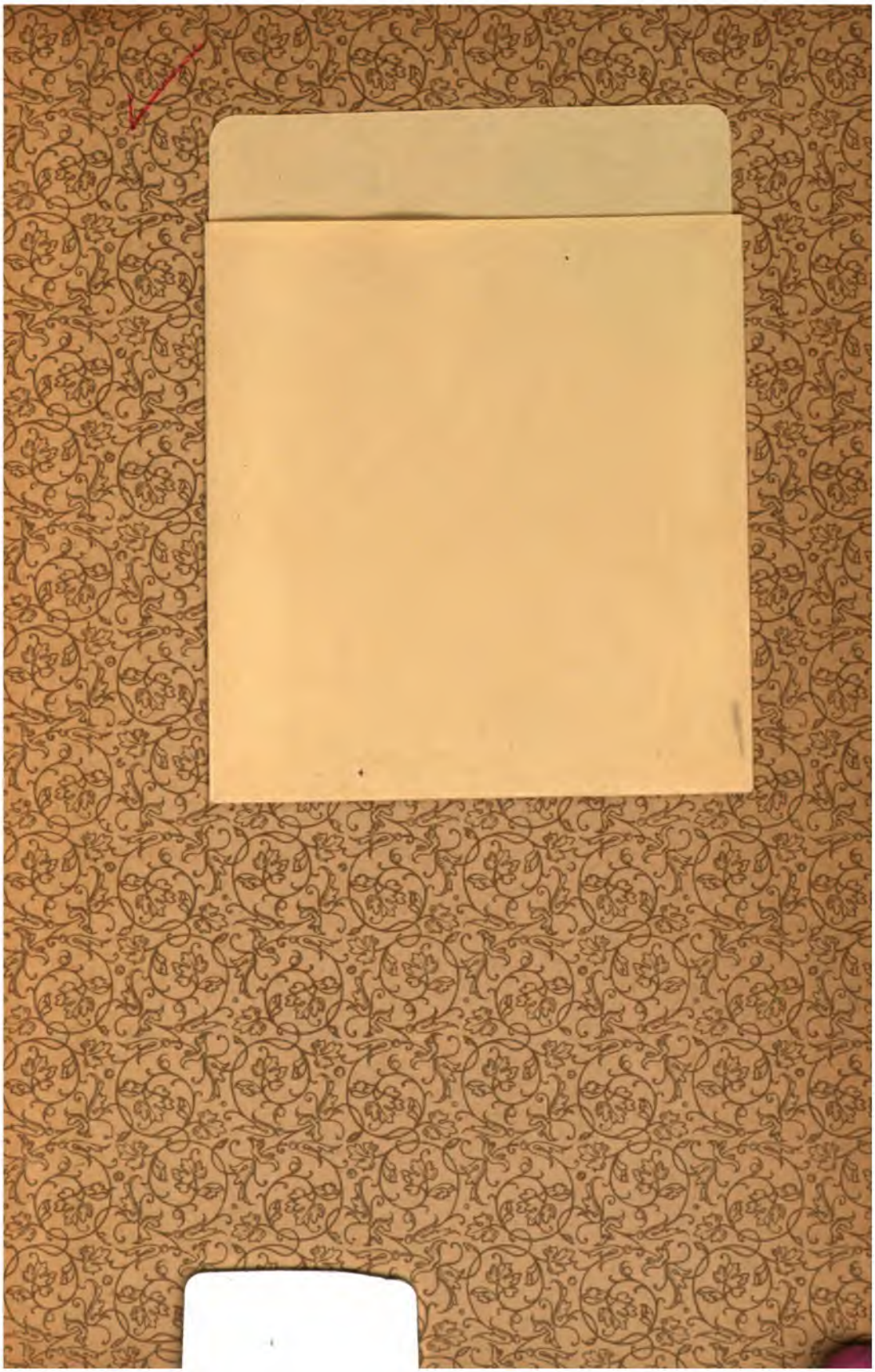
Pages.
§. III. Dilatation des corps..... 596
§ IV. Chaleurs spécifiques..... 603
§ V. Changement d'état des corps..... 609
§ VI. Mélanges réfrigérants..... 612
§ VII. Tension des vapeurs..... 613
§ VIII. Mélange des gaz et des vapeurs..... 617
§ IX. Hygrométrie..... 618

FIN DU PREMIER VOLUME.

CORBEIL. — TYP. ET STÉR. DE CRÉTÉ.

89088904925

b89088904925a



89088904925

B89088904925A